



Universidad
Zaragoza

**ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA
DE LA ALMUNIA DE DOÑA GODINA (ZARAGOZA)**

MEMORIA

Sistema “Cupidron”

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE SEGUIMIENTO DE RUTA PARA
UN DRON**

424.16.33

Autor: Daniel Fandos Duce

Director: Javier Esteban Escaño

Fecha: 08/11/2017

INDICE DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. ABSTRACT	1
1.2. MOTIVACIÓN	2
1.3. OBJETIVO	2
1.4. ANTECEDENTES	3
2. MARCO TEÓRICO	5
2.1. NORMATIVA Y LEGISLACIÓN A CUMPLIR.	5
2.2. PRINCIPIO DE VUELO DE UN DRON	7
2.3. SENSORES PARA DETECCIÓN DE OBSTÁCULOS	18
2.3.1. <i>Ultrasonidos</i>	18
2.3.2. <i>Sensores de triangulación</i>	21
2.4. BATERÍAS	24
2.5. COMUNICACIÓN INALÁMBRICA	28
2.6. GPS DIFERENCIAL	32
2.7. ELECCIÓN DE COMPONENTES	33
3. DESARROLLO	37
3.1. CÁLCULOS	45
3.1.1. <i>MAX1873SEEE</i>	45
3.1.2. <i>LTC3621</i>	49
3.1.3. <i>ESP32-WROOM</i>	51
3.1.4. <i>Cálculo de Capacidad de la Batería</i>	53
4. BIBLIOGRAFÍA	55

INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Dron Lily.....	4
Ilustración 2: Recomendaciones AESA para uso de Drones a nivel recreativo	5
Ilustración 3: Fuerzas del Vuelo en un Avion	7
Ilustración 4: Fuerzas del vuelo en un Helicoptero	8
Ilustración 5: Ejes de movimiento y rotación en un Dron	10
Ilustración 6: Diagrama de fuerzas estático	10
Ilustración 7: Rotacion Pitch	11
Ilustración 8: Diagrama de fuerzas durante el pitch	11
Ilustración 9: Rotacion Roll	12
Ilustración 10: Diagrama de fuerzas durante el roll	13
Ilustración 11: Rotacion Yaw.....	14
Ilustración 12: Diagrama de fuerzas durante el Yaw.....	14
Ilustración 13: Diagrama de variación de rpm en un Dron en aspa.....	16
Ilustración 14: Diagrama de variación de rpm en un Dron en Cruz.....	16
Ilustración 15: Sensor ultrasonidos genérico	18
Ilustración 16: Diagrama Detección de Ultrasonidos.....	19
Ilustración 17: Detección Ultrasonidos.....	20
Ilustración 18: Diagrama Funcionamiento de Triangulación	21
Ilustración 19: Diagrama Sensores triangulación	23
Ilustración 20: Batería Níquel-Hidruro Metálico.....	25
Ilustración 21: Baterías Ion Litio.....	26
Ilustración 22: Modelo OSI de 7 capas	28
Ilustración 23: Pines ESP32	34
Ilustración 24: Placa ESP32-WROOM.....	34
Ilustración 25: UML Coche	37

Ilustración 26: UML General Dron	39
Ilustración 27: UML Lectura Posiciones	39
Ilustración 28: UML Esquivar Obstáculo	40
Ilustración 29: UML Seguimiento Ruta	41
Ilustración 30: chip MAX1873SEEE	45
Ilustración 31: Pin 5 (CCI) del chip MAX1873SEEE	46
Ilustración 32: Pin 3 (CCS) del chip MAX1873SEEE	46
Ilustración 33: Pin 4 (CCV) del chip MAX1873SEEE	46
Ilustración 34: Pin 16 (VL) del chip MAX1873SEEE	46
Ilustración 35: Pin 13 (VH) del chip MAX1873SEEE	47
Ilustración 36: Pin 15 (DCIN) del chip MAX1873SEEE	47
Ilustración 37: Pin 9 (REF) del chip MAX1873SEEE	47
Ilustración 38: Condensador C _{BATT1}	48
Ilustración 39: Divisor de tensión en el pin 8 (VADJ) del chip MAX1873SEEE	48
Ilustración 40: Chip LTC3621-3.3	49
Ilustración 41: Chip LTC3621-5	49
Ilustración 42: ESP32WROOM	51
Ilustración 43: Resistencias de protección en los pines 4 y 5 del ESP32	52

1. INTRODUCCIÓN

El presente proyecto trata sobre la modificación de un quadróptero o dron para que sea capaz de seguir una ruta por caminos aptos para vehículos todoterreno (o 4x4), con la particularidad de hacerlo a una distancia fija por delante del vehículo gracias a tecnología de posicionamiento GPS. Al mismo tiempo captará imágenes del camino por delante del vehículo, emitiéndolo a una pantalla controlada por el copiloto, e igualmente grabará en vídeo el recorrido, tanto el entorno como al propio vehículo.

Las características que definirían a este sistema serán:

- Sistema de seguimiento de ruta a una distancia fija de un punto de referencia en movimiento.
- Piloto automático activable
- Sistema de captación de imagen.
- Emisión de la imagen y control del sistema desde una pantalla situada en el asiento del copiloto del vehículo

El alcance del proyecto es el diseño de un sistema de seguimiento de ruta y captación y emisión de imagen desde un quadróptero o dron e integrarlo en un dron comercial. Desde este punto en adelante llamaremos a este sistema "Cupidron". Ya que el dron actuaría como un Copiloto vigilando el camino que tomamos.

1.1. ABSTRACT

This Project consists in a modification of a quadcopter or drone so it can follow a preloaded GPS track at a fixed distance in front of a vehicle. While at the same time record or capture both the vehicle and the path ahead of it and display it on a Screen in the co-pilot's seat.

The characteristics that define this system are:

- GPS track flight at a fixed distance of a moving reference point (vehicle)
- Auto Pilot on/off
- Image Capture and Recording System ahead and behind the drone.
- Image broadcasting and system control from a screen situated in the co-pilot's seat.

The reach of this Project is the design of a GPS track Flight and Image Record and Capture System from a drone in order to integrate it in a commercial drone. From this point on we are going to call the system "*Copidron*". The name comes from the role the drone would have surveilling the road and telling us what comes ahead as if it were our copilot.

1.2. MOTIVACIÓN

A la hora de realizar una ruta en todoterreno por caminos nos encontramos diversos obstáculos que son los que hacen atractiva la ruta. Sin embargo, estos obstáculos dejan de ser entretenidos y pasan a ser un peligro cuando aparecen repentinamente con escasa posibilidad de anticipación. Por ejemplo, a la salida de una curva sin visibilidad o también tras un cambio de rasante, puede aparecer un corrimiento de tierra o un árbol caído, dificultando o incluso impidiendo la circulación. Estos imprevistos pueden conllevar un accidente, con lesiones para los ocupantes y/o daños en el vehículo. Evitar estas situaciones de peligro es lo que motiva la realización de este proyecto. Si se pudiese eliminar esa falta de visibilidad, al tomar una curva o en un cambio de rasante, ese peligro disminuiría considerablemente pudiendo incluso eliminarlo.

1.3. OBJETIVO

El objetivo de este proyecto es diseñar un sistema que permita observar con antelación el estado del camino, para que el conductor pueda anticiparse a los peligros que puedan encontrarse en la ruta en todoterreno. El sistema deberá seguir la ruta que seguiría el coche, mediante el posicionamiento GPS, a la distancia adecuada para no perder la comunicación con el mismo. A su vez deberá mostrar al copiloto lo que le espera más adelante en el camino. Todo esto mientras es capaz de eludir los posibles obstáculos: ramas de árboles, túneles, cortados, etc.

A continuación, especificaremos una serie de factores que nos limitarán el sistema, que serán resumidos al final del apartado.

Será suficiente con que el sistema pueda alcanzar una velocidad de unos 80 km/h. Ya que está pensado para rutas por camino, y por estos se va a una media de unos 50 km/h con un máximo de aproximadamente 70-80 km/h.

Dado que principalmente se usará en las partes complicadas de la ruta con que tenga una autonomía de 30 minutos es suficiente.

En cuanto a la altura de vuelo el sistema volará normalmente a unos 3 metros del suelo, variándose esta altura únicamente en caso de que se encuentre con un obstáculo. En cuyo caso bajará de altitud.

En resumen, los principales parámetros o características del sistema serán:

- Velocidad máxima de 80 km/h.
- Autonomía de 30 minutos.
- Altura de vuelo de 3 metros.

1.4. ANTECEDENTES

Nos decantaremos por un sistema de quadróptero o dron.

Un quadróptero, o dron, es un helicóptero con cuatro rotores. Los rotores están dirigidos hacia arriba y posicionados en forma de cuadrado con una distancia igual al centro de masas del quadróptero. Dichos rotores pueden estar distribuidos en forma de aspa o de cruz. El diseño más común por su mayor estabilidad durante el vuelo es en aspa. El dron se controla ajustando las velocidades angulares de los rotores que giran gracias a unos motores eléctricos. El quadróptero es un diseño típico de vehículo aéreo no tripulado (VANT o UAV) debido a su estructura simple. Son utilizados en video vigilancia, búsqueda y rescate, inspección de construcciones y muchas otras aplicaciones. Los drones han recibido considerable atención de los investigadores recientemente.

El modelo dinámico básico del quadróptero es el punto de inicio de todos los estudios, pero se han ido introduciendo propiedades aerodinámicas más complejas (Hoffmann, Huang, Waslander, & Tomlin, n.d.; Huang, Hoffmann, Waslander, & Tomlin, 2009). También se han investigado diferentes métodos de control, incluyendo controladores PID (Bouabdallah, Noth, & Siegwart, 2004; Dikmen, Arisoy, & Temeltas, 2009; Tayebi & McGilvray, 2004; Zuo, 2010), control *backstepping* (Madani & Benallegue, 2006; Zemalache, Beji, & Marref, 2005), control no lineal H^∞ (Raffo, Ortega, & Rubio, 2010), controladores LQR (Bouabdallah et al., 2004), controladores no lineales con saturaciones anidadas (Castillo, Lozano, & Dzul, 2005; Escareno, Salazar-Cruz, & Lozano, 2006). Los métodos de control requieren una información precisa de la posición y otras medidas realizadas con un giroscopio, un acelerómetro y otros dispositivos de medición, como un GPS, sensores sonda y laser (He, Prentice, & Roy, 2008; Martin & Salaun, 2010).

El método de estabilización que usaremos nosotros se apoyará en un giroscopio.

Un ejemplo de un dron con un sistema similar al propuesto sería el dron seguidor Lily. ("Lily," n.d.)

Es un dron comercial que al encenderlo sigue una baliza que el usuario lleva encima, y le graba mientras le sigue. Está pensado principalmente para deportistas. Este dron tiene un tiempo de vuelo aproximado de 20 minutos y un tiempo de carga de batería de unas 2h.

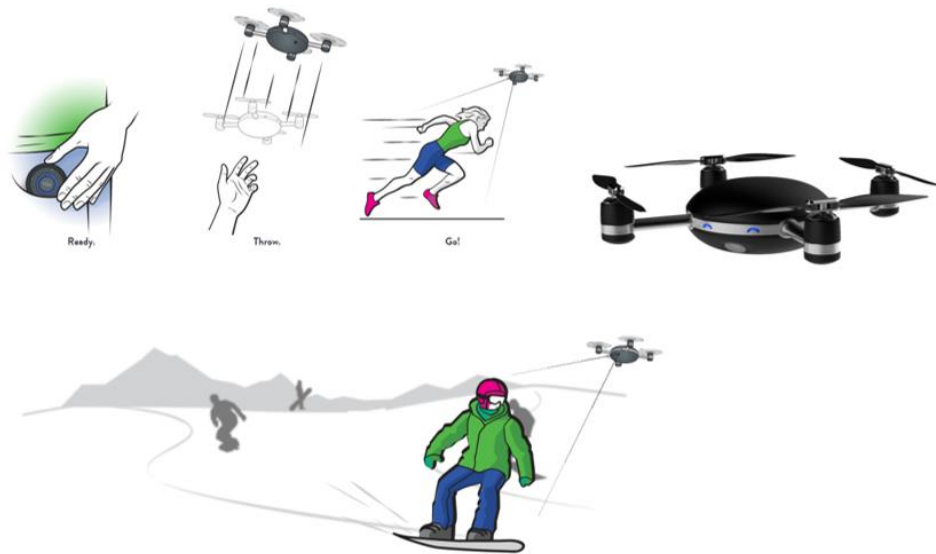


Ilustración 1: Dron Lily

Otro ejemplo sería el dron de video vigilancia desarrollado en la Universidad de Virginia (Chirtel et al., 2015). Un dron pensado para la videovigilancia en zonas donde no hay cobertura GPS. Para ello se apoyan en el sistema de sensores de control de Android.

También tendríamos el dron diseñado por Alex G. Kendall, Nishaad N. Salvapantula y Karl A. Stol para el control y seguimiento de un objeto con un sistema on-board mediante una cámara. (Kendall, Salvapantula, & Stol, 2014)

2. MARCO TEÓRICO

En los siguientes apartados se explicará de forma resumida los conceptos teóricos mencionados en los antecedentes y que se deben conocer para poder llevar a cabo el diseño del Sistema "Cupidron". Pero antes de eso explicaremos la normativa y legislación que hay que cumplir.

2.1. NORMATIVA Y LEGISLACIÓN A CUMPLIR.

En el siguiente cartel podemos ver las recomendaciones que da AESA para el uso de drones para uso recreativo o personal.

Hobby / Vuelos recreativos

¿Qué puedo hacer con mi DRON?

El uso de un dron como hobby o como vuelo recreativo no necesita habilitación de AESA, pero debe cumplir unas normas de seguridad. Para cualquier otro uso de un dron sí hay que acudir a AESA.

¿Qué debo saber antes de utilizar un DRON?

- ✓ Siempre tengo que tenerlo a la vista y no superar los 120 metros de altura.
- ✓ No es necesario ser piloto pero se debe saber volar con seguridad.
- ✓ Sólo se pueden volar los drones en zonas adecuadas para ello. Por ejemplo, zonas de vuelo de aeromodelismo, zonas despobladas, etc.
- ✓ Los daños que cause el dron son responsabilidad de quién lo maneja.

¿Qué NO puedo hacer con un DRON?

- ⊘ No puedo volarlo en zonas urbanas.
- ⊘ No puedo volarlo sobre aglomeraciones de personas: parques, playas, conciertos, bodas, manifestaciones, procesiones, etc.
- ⊘ No puedo volarlo de noche.
- ⊘ No puedo volarlo cerca de aeropuertos, aeródromos, etc.
- ⊘ No puedo volarlo donde se realicen vuelos con otras aeronaves a baja altura (zonas de parapente, paracaidismo, aeródromos, helipuertos, etc.).
- ⊘ No puedo poner en peligro a terceros.

EL DRON NO ES UN JUGUETE, ES UNA AERONAVE
El uso imprudente de un dron puede tener consecuencias.
Las multas por su uso indebido pueden alcanzar los 225.000 euros.

¡DIVERTIRSE SIGNIFICA VOLAR DE FORMA SEGURA!
Evite poner en peligro a otros aviones y a las personas y bienes en tierra.

Para más información: www.seguridadaerea.gob.es



Ilustración 2: Recomendaciones AESA para uso de Drones a nivel recreativo

Estas recomendaciones vienen de las normativas que sí que hay que cumplir cuando el uso que se pretende dar al dron es profesional o de investigación.

En primer lugar, está la *Ley 18/2014* que, en sus artículos 50 a 53, regula la operación de aeronaves civiles pilotadas por control remoto. De acuerdo con estos artículos no se puede volar a más de 120 metros de altura, ni a más de 500 metros del piloto.

El Real Decreto 552/2014, de 27 de junio, por el que se desarrolla el Reglamento del aire y disposiciones operativas comunes para los servicios y procedimientos de navegación aérea y se modifica el Real Decreto 57/2002, del 18 de enero, por el que se aprueba el Reglamento de Circulación Aérea en su Capítulo II Artículo 4.1 dice:

1. No se realizará ningún vuelo sobre aglomeraciones por debajo de las alturas mínimas previstas en SERA.3105, salvo aquellas operaciones que, excepcionalmente y por razones de interés general debidamente justificadas, se autoricen por el Director de Seguridad de Aeronaves de la Agencia Estatal de Seguridad Aérea a instancias del operador, sin perjuicio de las alturas mínimas que resulten de la aplicación conforme a la normativa específica que regula las distintas actividades aeronáuticas y de las exenciones para operaciones especiales.

De acuerdo a este artículo no se puede volar por encima de aglomeraciones de gente, edificios en ciudades, pueblos o lugares habitados, o sobre una reunión de personas al aire libre, a menos que se vueles a una altura que permita, en caso de emergencia, efectuar un aterrizaje sin peligro excesivo para las personas o la propiedad que se encuentren en la superficie.

La legislación sobre drones y aeronaves civiles pilotadas por control remoto, especialmente si se usa con fines de captación de imágenes o recolección de información está en constante cambio y adaptación. Ya que estas tecnologías avanzan más rápido de lo que lo hace la ley. Por lo cual hay que estar regularmente comprobando las nuevas leyes y normativas que se aprueben para este tema.

2.2. PRINCIPIO DE VUELO DE UN DRON

Antes de hablar de cómo y en qué se apoya un dron para volar habría que hablar de cómo vuela cualquier vehículo y de qué fuerzas afectan al vuelo.

Existen 4 fuerzas que actúan en el vuelo de cualquier objeto:

- Sustentación
- Peso
- Resistencia
- Empuje

Para que en un avión (o aeronave de ala fija) exista sustentación es necesario que haya una fuerza de empuje.

Dependiendo de la construcción del elemento, y de la forma en la que genere el empuje, las fuerzas se disponen de diferente manera alrededor del objeto.

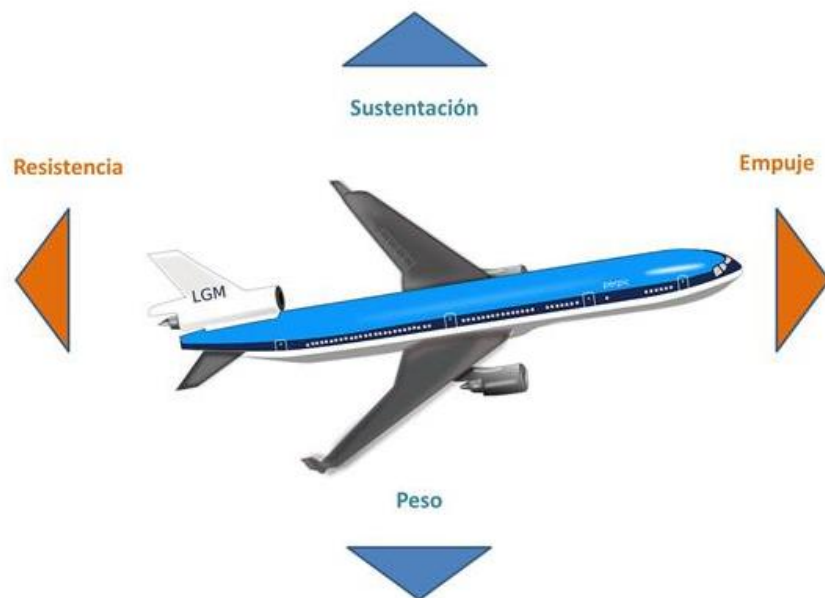


Ilustración 3: Fuerzas del Vuelo en un Avion

Habitualmente en un avión el empuje es longitudinal al mismo, la resistencia es contraria al empuje, la sustentación siempre es hacia arriba y el peso hacia abajo, como puede verse en la imagen 2.

En una aeronave de tipo multirotor la disposición de fuerzas es similar con la diferencia de que pueden permanecer estáticos.

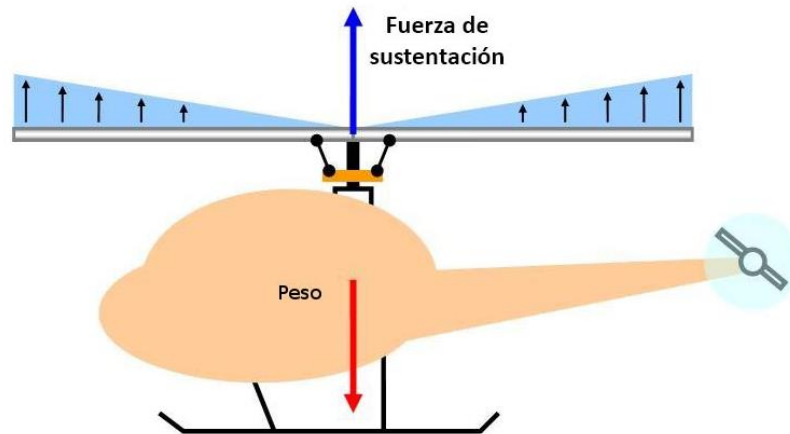


Ilustración 4: Fuerzas del vuelo en un Helicoptero

El empuje en este tipo de aeronaves depende, de forma básica, de la inclinación de las alas respecto a la fuerza de sustentación, con diferentes sistemas utilizados para realizar dicha inclinación, dependiendo del tipo de aeronave. En el caso de los drones se consigue variando la velocidad de giro de cada rotor, de esa forma se inclina el dron en una dirección u otra.

En un vehículo volador, las hélices son realmente una gran ala giratoria ya que tienen una forma aerodinámica, por la cual generan una sustentación.

El funcionamiento de una hélice se puede entender de una manera muy sencilla, comparándola con un tornillo, que al girar se impulsa a él mismo. Cada una de las palas de la hélice tiene un ángulo de ataque que hace que el viento relativo pase al girar la hélice. Al aumentar la velocidad de giro, la masa de aire acelerada va pasando hacia abajo y hace que la hélice "sienta" una fuerza en la dirección opuesta. Lo anterior se refiere a la tercera ley de Newton de acción y reacción.

La característica más importante de la hélice dentro de la ecuación de sustentación será la dimensión de una pala, es decir, el radio del disco generado por el giro. Además, se considera el perfil de la pala y el ángulo de ataque aerodinámicamente correcto.

La sustentación es la fuerza, perpendicular a la velocidad, que mantiene a un cuerpo en vuelo. La expresión matemática está definida como:

$$L = \frac{1}{2} C_L \rho A V^2 \text{ (ecuación 1)}$$

Transformando la ecuación a un vehículo de ala giratoria se tiene:

$$L = \frac{1}{2} C_L \rho A V^2 \frac{R^2}{R^2} \text{ (ecuación 2)}$$

$$L = \frac{1}{2} C_L \rho A \omega^2 R^2 \text{ (ecuación 3)}$$

Donde:

V : Velocidad lineal

C_L : Coeficiente de sustentación (obtención experimental)

ρ : Densidad del aire (1,3 kg/m³)

ω : Velocidad angular

R : Longitud de cada una de las palas

A : Área disco rotor

La sustentación debe ser capaz de superar el peso del vehículo de masa m para elevarse o ser igual para mantenerse en vuelo estático. Se puede extraer una relación para encontrar la longitud de las palas con la ecuación 3 y la segunda ley de Newton:

$$\text{peso} = mg = \frac{1}{2} C_L \rho A \omega^2 R^2 \text{ (ecuación 4)}$$

$$R \geq \left(\frac{2mg}{\rho C_L \omega^2 \pi} \right)^{\frac{1}{4}} \text{ (ecuación 5)}$$

Normalmente por seguridad se establece que el dron debe ser capaz de generar un empuje del doble de su peso. Este empuje se reparte entre los rotores de los que se componga el dron:

$$\text{Empuje necesario por rotor} = \frac{\text{Peso del Dron} \cdot 2}{\text{N}^\circ \text{ Rotores}} \text{ (ecuación 6)}$$

A continuación, explicaremos cómo hacer que el dron avance en la dirección que nosotros queremos.

Los ejes sobre los que trabajamos son los siguientes:

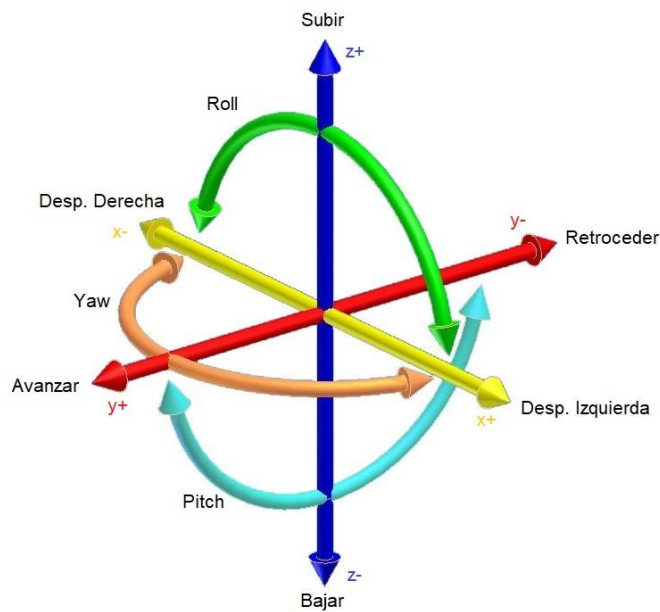


Ilustración 5: Ejes de movimiento y rotación en un Dron

El movimiento de rotación Pitch es el que nos permite que el dron avance(y+) o que retroceda(y-). El movimiento de rotación Roll es el que nos permite desplazarnos hacia la derecha (x-) o la izquierda (x+). Y el movimiento de rotación Yaw es el que nos permite hacer que el dron rote sobre sí mismo.

Si los 4 rotores generan el mismo empuje el dron se mantiene en el aire sin ninguna rotación en ninguno de los sentidos.

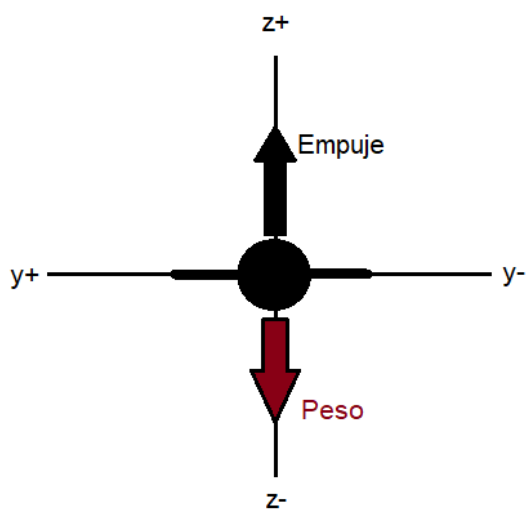


Ilustración 6: Diagrama de fuerzas estático

En este caso solo existen 2 fuerzas que afecten al dron: El empuje y el peso. Para esta distribución de empujes existen 3 posibilidades de desplazamiento:

- Si el empuje generado por los 4 rotores es igual al peso el dron mantendrá la altura y se mantendrá estático en el aire.
- Si el empuje es superior al peso del dron nos elevaremos
- Si el empuje es inferior al peso del dron descenderemos

El movimiento de rotación pitch se consigue variando los empujes de los rotores delanteros, o los traseros, en igual medida.

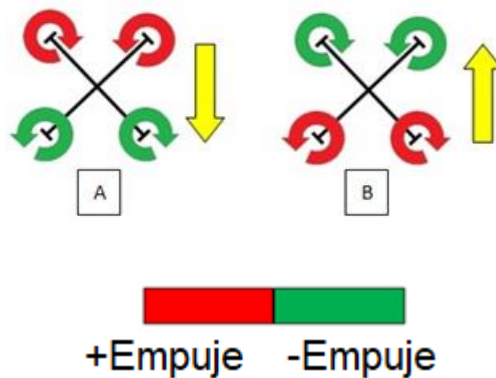


Ilustración 7: Rotacion Pitch

El diagrama de fuerzas en este caso quedaría así:

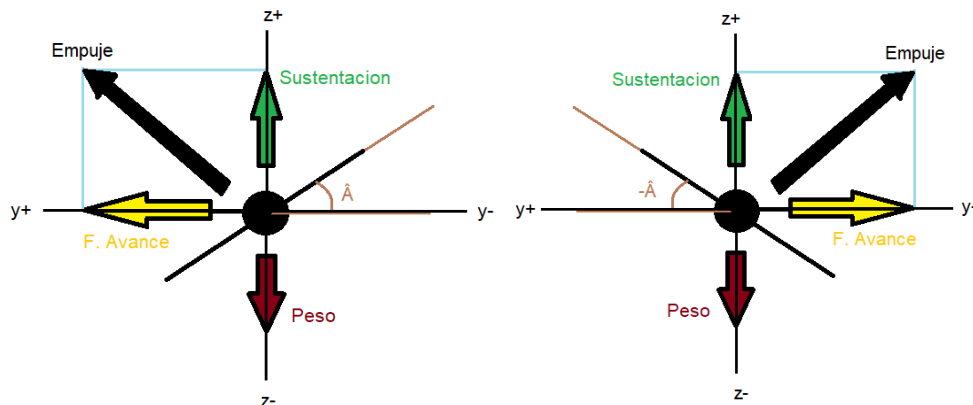


Ilustración 8: Diagrama de fuerzas durante el pitch

Al hacer el movimiento de rotación pitch el empuje que generan los rotores del dron se descompone en 2 fuerzas: Fuerza de Avance y Sustentación. El sentido de la fuerza de avance, y por tanto el del movimiento, dependerá de si los rotores que generan más empuje son los delanteros o los traseros.

En esta rotacion nos encontramos 6 casos posibles para desplazarnos:

- Solo los dos rotores traseros aumentan su empuje: El dron avanza (y+) y nos elevamos (z+).
- Solo los dos rotores traseros disminuyen su empuje: El dron retrocede (y-) y disminuimos altura (z-).
- Solo los dos rotores delanteros aumentan su empuje: El dron retrocede (y-) y nos elevamos (z+).
- Solo los dos rotores delanteros disminuyen su empuje: El dron avanza (y+) y disminuimos altura (z-)
- Los rotores traseros aumentan su empuje y los delanteros lo disminuyen en igual medida: El dron avanza (y+) manteniendo la altura.
- Los rotores delanteros aumentan su empuje y los traseros lo disminuyen en igual medida: El dron retrocede (y-) manteniendo la altura.

A efectos de simplificar el control nosotros solo consideraremos las dos posibilidades ultimas y por programa se combinará con los movimientos de elevación y descenso.

El movimiento de rotación roll se consigue variando el empuje de los rotores del lateral izquierdo, o derecho en igual medida.

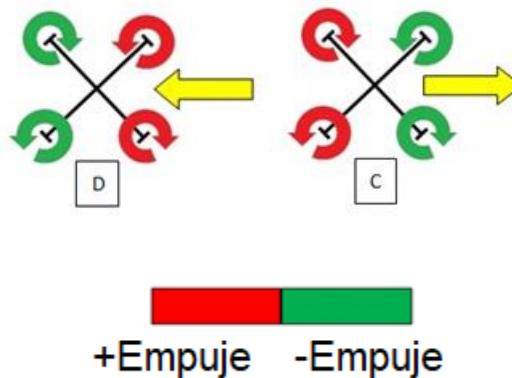


Ilustración 9: Rotacion Roll

El diagrama de fuerzas que se genera es así:

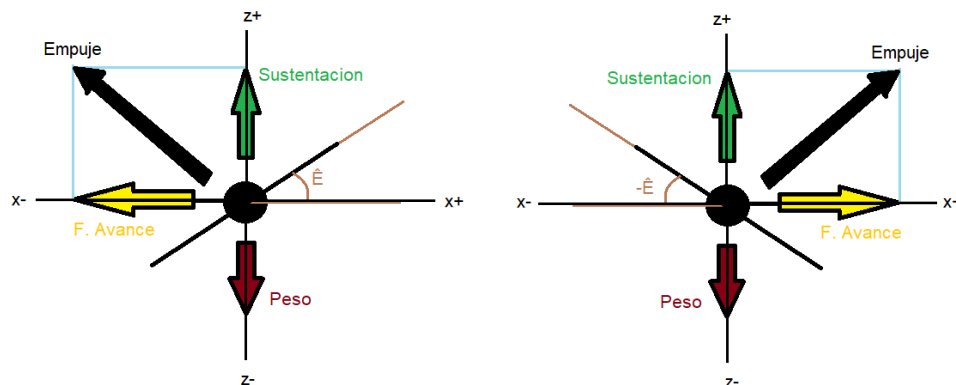


Ilustración 10: Diagrama de fuerzas durante el roll

Al igual que durante el pitch el empuje se divide en dos fuerzas: Fuerza de avance y sustentación. La fuerza de Avance es la que determina el sentido de movimiento y este dependerá de que par de motores varían, y de qué forma, su empuje.

También igual que durante el roll nos encontramos con 6 distintos casos de movimiento:

- Solo los dos rotores del lateral izquierdo aumentan su empuje: El dron se desplaza hacia la derecha ($x-$) y nos elevamos ($z+$).
- Solo los dos rotores del lateral izquierdo disminuyen su empuje: El dron se desplaza hacia la izquierda ($x+$) y disminuimos altura ($z-$).
- Solo los dos rotores del lateral derecho aumentan su empuje: El dron se desplaza hacia la izquierda ($x+$) y nos elevamos ($z+$).
- Solo los dos rotores del lateral derecho disminuyen su empuje: El dron se desplaza hacia la derecha ($x-$) y disminuimos altura ($z-$).
- Los rotores del lateral izquierdo aumentan su empuje y los del lateral derecho lo disminuyen en igual medida: El dron se desplaza hacia la derecha ($x-$) manteniendo la altura.
- Los rotores del lateral derecho aumentan su empuje y los del lateral izquierdo lo disminuyen en igual medida: El dron se desplaza hacia la izquierda ($x+$) manteniendo la altura.

A efectos de simplificar el control nosotros solo consideraremos las dos posibilidades últimas y por programa se combinará con los movimientos de elevación y descenso.

El movimiento de rotación yaw se consigue variando el empuje emparejando los rotores cruzados. Es decir, delantero derecho con trasero izquierdo y delantero izquierdo con trasero derecho.

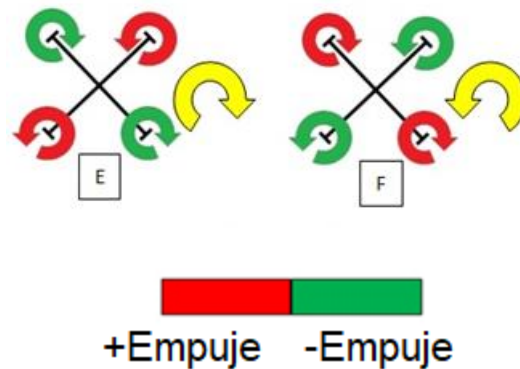


Ilustración 11: Rotacion Yaw

El diagrama de fuerzas generado durante esta rotación es el siguiente:

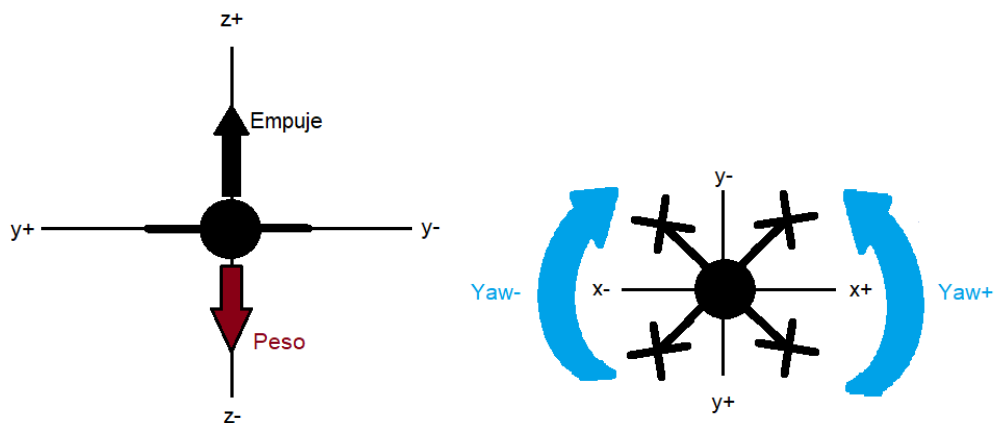


Ilustración 12: Diagrama de fuerzas durante el Yaw

Al no haber inclinación del dron durante el yaw el dron no se desplaza ni lateral ni longitudinalmente. Solo gira sobre sí mismo y dependiendo de cómo variemos los empujes de los rotores se elevará o descenderá. En este movimiento tenemos 6 posibles casos:

- El motor delantero izquierdo y el motor trasero derecho aumentan su empuje: el dron gira sobre sí mismo en el sentido de las agujas del reloj (Yaw-) y asciende (z+).
- El motor delantero izquierdo y el motor trasero derecho disminuyen su empuje: el dron gira sobre sí mismo en el sentido contrario a las agujas del reloj (Yaw+) y descende (z-).

- El motor delantero derecho y el motor trasero izquierdo aumentan su empuje: el dron gira sobre sí mismo en el sentido contrario a las agujas del reloj (Yaw+) y asciende (z+).
- El motor delantero derecho y el motor trasero izquierdo disminuyen su empuje: el dron gira en el sentido de las agujas del reloj (Yaw-) y desciende (z-)
- El motor delantero izquierdo y el motor trasero derecho aumentan su empuje mientras que los otros dos lo disminuyen en igual medida: El dron gira en el sentido de las agujas del reloj (Yaw-)
- El motor delantero derecho y el motor trasero izquierdo aumentan su empuje mientras los otros dos lo disminuyen en igual medida: El dron gira en el sentido contrario a las agujas del reloj (Yaw+)

A efectos de simplificar el control nosotros solo consideraremos las dos posibilidades ultimas y por programa se combinará con los movimientos de elevación y descenso.

De forma que tenemos en total 8 movimientos:

- Retroceso: Se consigue aumentando el empuje de los rotores delanteros y disminuyendo el de los traseros en igual medida. (A)
- Avance: Se consigue aumentando el empuje de los rotores traseros y disminuyendo el de los delanteros en igual medida. (B)
- Desplazamiento hacia la derecha: Se consigue aumentando el empuje de los rotores del lateral izquierdo y disminuyendo el de los del lateral derecho en igual medida. (C)
- Desplazamiento hacia la izquierda: Se consigue aumentando el empuje de los rotores del lateral derecho y disminuyendo el de los del lateral izquierdo en igual medida. (D)
- Giro negativo: Se consigue aumentando el empuje del rotor delantero derecho y del rotor trasero izquierdo y disminuyendo el de los otros 2 en igual medida (E)
- Giro positivo: Se consigue aumentando el empuje del rotor delantero izquierdo y del rotor trasero derecho y disminuyendo el de los otros 2 en igual medida. (F)
- Ascensión: Se consigue aumentando el empuje de los 4 rotores en igual medida. (G)
- Descenso: Se consigue disminuyendo el empuje de los 4 rotores en igual medida. (H)

En el diagrama de la imagen 13 se puede ver un resumen de cómo hay que variar los empujes de los rotores de un quadcóptero con distribución en aspa.

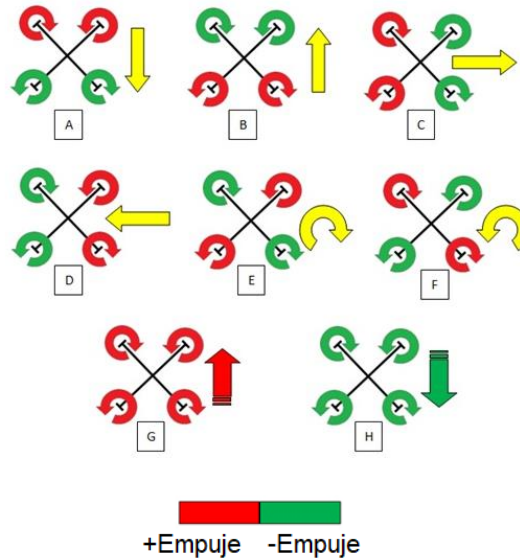


Ilustración 13: Diagrama de variación de rpm en un Dron en aspa

En el caso de un dron con distribución en cruz la forma de moverse en los ejes x e y es más sencillo. Solo hay que aumentar el empuje del rotor contrario a la dirección en la que queremos ir, y disminuir el contrario en concordancia, mientras mantienes los del otro eje con el mismo empuje:

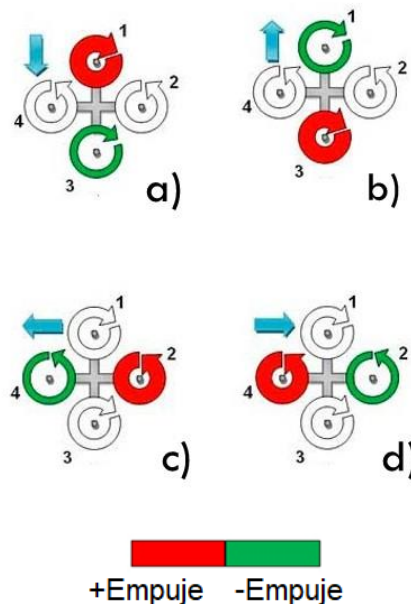


Ilustración 14: Diagrama de variación de rpm en un Dron en Cruz

Para que un dron con distribución en cruz gire sobre sí mismo hay que aumentar o disminuir el empuje de cada rotor igual que el de su mismo eje:

Si queremos que gire en sentido positivo (contrario a las agujas del reloj) aumentamos el empuje del rotor delantero y trasero y disminuimos el de los laterales.

Si queremos que gire en sentido negativo (mismo sentido que las agujas del reloj) aumentamos el empuje de los motores laterales mientras disminuimos el del delantero y trasero.

La distribución que usaremos nosotros es la distribución en aspa ya que así es más sencillo que no se vea por la cámara el rotor girando.

Para variar el empuje que cada rotor proporciona lo que hay que hacer es o bien variar el diámetro del aspa (lo cual no podemos cambiar en mitad del vuelo) o variar las revoluciones a las que gira el rotor. Esto último se hace con un ESC (electronic speed controller).

El funcionamiento del ESC consiste en que este, a través de una entrada de control de tipo PWM, varía la alimentación del rotor con lo que varía la velocidad de giro del mismo desde 0 rpm hasta el máximo que ofrezca el rotor elegido.

2.3. SENSORES PARA DETECCIÓN DE OBSTÁCULOS

2.3.1. Ultrasonidos

Los ultrasonidos son, junto con los sistemas ópticos, los dos métodos de detección de presencia y medición de distancia sin contacto más empleados actualmente. La detección por ultrasonidos frente a la detección óptica es el método más barato y más sencillo de implementar. (NAVARRO, RÍOS, & PARRA, 2004) (Ferdegini, Brengi, & Lupi, 1998)

Este tipo de sistema consiste generalmente en un sistema emisor-receptor que emite una onda de ultrasonidos que al impactar contra una superficie rebota y es captada por el receptor.



Ilustración 15: Sensor ultrasonidos genérico

Por lo tanto, para poder detectar la distancia a la cual se encuentra el objeto que provoca el rebote de la onda es necesario medir el tiempo transcurrido entre el instante en el que se emite la onda y el instante en el cual la onda llega al receptor, pudiendo calcular la distancia recorrida según la siguiente expresión:

$$d = v_s \cdot t_f \text{ (ecuación 7)}$$

Siendo d la distancia recorrida, v_s la velocidad del sonido y t_f el tiempo transcurrido, denominado también tiempo de vuelo (del inglés Time of fly).

Puesto que lo que nos interesa es conocer la distancia hasta el objeto que provoca el rebote, es necesario dividir la distancia obtenida anteriormente entre dos, ya que, al ser la velocidad del sonido constante, el tiempo que transcurre entre la emisión de la onda y el impacto contra el objeto es el mismo que el transcurrido entre el rebote y la recepción de la onda. Por lo tanto, la expresión que nos permitirá calcular la distancia hasta un objeto cualquiera será:

$$d = \frac{1}{2} \cdot v_s \cdot t_f \text{ (ecuación 8)}$$

El primer pequeño problema que surge con este tipo de sistema de detección es que la velocidad del sonido depende en gran medida del ambiente de medición. Y es que la velocidad del sonido en el aire varía en función de la temperatura atendiendo a la siguiente ecuación:

$$v_1 = v_0 \cdot \sqrt{1 + \frac{T}{273}} \text{ (ecuación 9)}$$

Donde v_0 es la velocidad del sonido a 0° Celsius, es decir 331 m/s, y T la temperatura del medio expresada en grados centígrados.

A pesar de que la velocidad del sonido varíe con la temperatura del medio, se ha comprobado que si no se tiene en cuenta dicho efecto el error cometido en la medición de la distancia no es muy significativo, y es menos significativo aun en distancias pequeñas.

De todas formas, si se quisiese obtener una medición lo más exacta posible, bastaría con combinar las dos expresiones mencionadas anteriormente, quedando la expresión de la distancia de la siguiente manera:

$$d = \frac{1}{2} \cdot 331 \cdot \sqrt{1 + \frac{T}{273}} \cdot t_f \text{ (ecuación 10)}$$

Otro problema relacionado con la medición por ultrasonidos reside en el ancho del haz emitido y de los lóbulos laterales generados. La presencia de dichos lóbulos puede traducirse en dos problemas diferentes: la subestimación y la sobrestimación de la distancia.

El primer problema se produce debido a que los lóbulos laterales pueden ir a parar al receptor lo que daría lugar a una medición errónea del tiempo de vuelo y por tanto la distancia medida sería menor que la distancia real al objeto.

La sobrestimación se produce debido a que los sistemas pulso-eco emplean el propio eco para manejar los circuitos de temporización, por lo que la reducción de la intensidad del eco que pudiese producirse se traduciría en una sobrestimación del tiempo de vuelo y por tanto de la distancia al objeto.

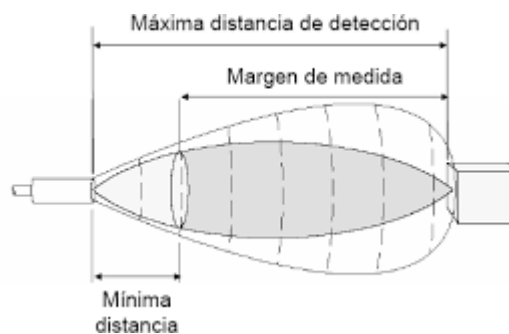


Ilustración 16: Diagrama Detección de Ultrasonidos

Estos dos problemas han sido minimizados principalmente por los propios fabricantes de los transductores, que se han esforzado en diseñar emisores que minimicen lo máximo posible la generación de lóbulos laterales.

Como se ha mencionado anteriormente, el método más empleado para la detección de un objeto es la medición del tiempo de vuelo. La forma más común de medir dicho tiempo es el método del umbral, en el cual el tiempo de llegada de la onda ultrasónica al receptor se mide cuando dicha onda supera un determinado umbral de amplitud definido. Puesto que la onda a lo largo de su camino puede verse atenuada, dicho umbral puede ser variable en función del tiempo, de manera que cuanto más tiempo haya transcurrido desde la emisión del pulso, menor será el umbral de detección.

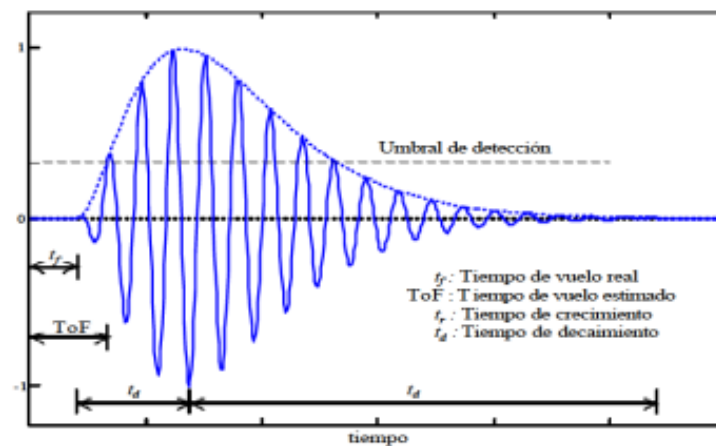


Ilustración 17: Detección Ultrasonidos

2.3.2. Sensores de triangulación

Principio de los sistemas de triangulación láser (Cuesta, Fernández, Rico, Álvarez, & Blanco, 2005):

Este tipo de sistemas se basa en la construcción específica de la que constan. La fuente de luz y el sensor no están alineados, sino que forman un determinado ángulo que es el llamado ángulo de triangulación. La fuente de luz proyecta un rayo sobre la superficie de la pieza y el fotodetector recoge la luz reflejada y la luz difusa sobre la superficie de la pieza. Como sabemos en qué dirección se va propagar el rayo para saber posición del punto que estamos digitalizando, solo nos hará falta determinar la distancia a la que el rayo es proyectado sobre la superficie de la pieza. Es mediante la lectura del fotodetector y el ángulo de triangulación como hallamos esta distancia.

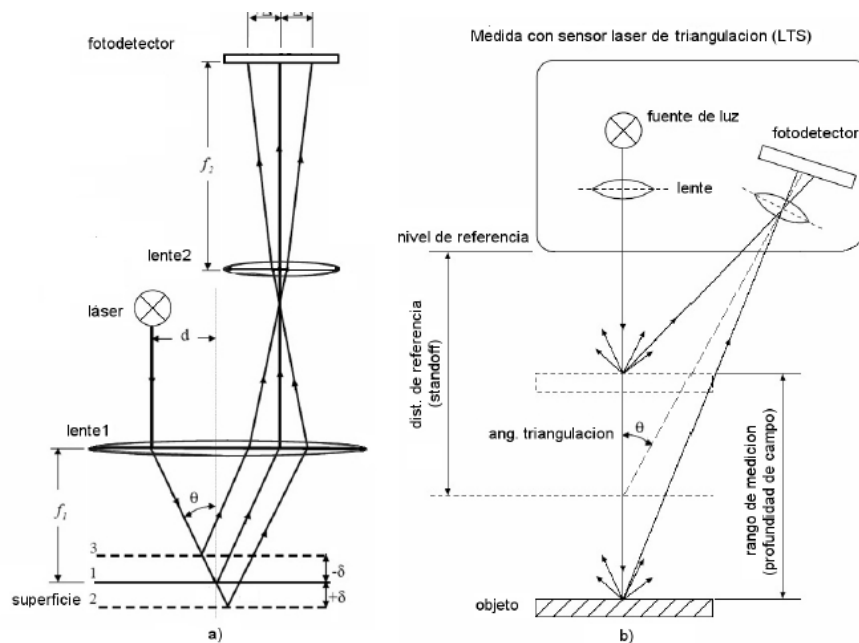


Ilustración 18: Diagrama Funcionamiento de Triangulación

Pasamos a analizar el esquema anterior. Observamos que, dada la geometría de este sistema, mediante la triangulación, podemos obtener las coordenadas de los puntos leídos con el fotodetector.

En la imagen de la izquierda a) podemos observar un sistema básico de triangulación que trabaja con la luz que el objeto refleja.

En la imagen de la derecha b) podemos apreciar una configuración mucho más habitual de este tipo de sistemas, en este caso empleamos luz difusa que se produce cuando el láser incide sobre la superficie. En esta misma imagen podemos analizar los siguientes parámetros:

- Distancia de referencia (standoff): ésta es la encargada de delimitar la posición del centro del campo de medida con respecto al sensor.
- Ángulo de triangulación: es el ángulo que hay entre el haz que incide en la pieza y el reflejado hacia el fotodetector.
- Profundidad de campo o rango de medición: determina los límites geométricos del objeto que es capaz de captar el fotodetector.

Fuentes de luz:

Esto depende de cada sistema, pero lo más habitual es encontrarse con luces estructuradas y sobre todo las fuentes láser, que son las que emiten luz en un estrecho rango de onda.

La luz láser pasa a través de unas lentes que lo que hacen es focalizar el haz de luz para así tener una mayor precisión, reduciendo el punto lo máximo posible. Una vez hecho esto, se presentan también lentes focalizadoras y filtros de longitud de onda, que solo permiten que pase hacia el fotodetector la luz que tiene la misma longitud de onda que el láser.

En estos sistemas el tipo de luz láser que se emplea puede ser muy variado pero lo que se trata en los equipos industriales de reducido tamaño es que la λ , la longitud de onda de emisión sea lo menos dispersa posible para así tener una mayor precisión para una mayor calidad de láser. Para ello lo más habitual es emplear un láser con diodo de luz roja.

Fotodetectores:

Los hay de diferentes tipos, pero los más comunes son los PSD (position sensitive detector) y los CCD (charge coupled device). Los PSD son los dispositivos analógicos que pueden medir el desplazamiento de un punto de luz sobre una línea a una superficie en función de las diferencias de corriente que se establece en los dos extremos opuestos. Los CCD son dispositivos digitales, permiten una frecuencia de muestreo más alta, lo que se transmite en una mayor rapidez de ejecución.

La mayor diferencia que podemos encontrar entre PSD y CCD es la manera en la que estos capturan el punto de luz. Mientras que el PSD recibe el punto de luz como una distribución dentro de la cual tienen diferentes intensidades e integra toda esta distribución para determinar las coordenadas del punto leído como un promedio de toda la cantidad de luz recibida, el CCD reacciona ante la intensidad más que ante la cantidad de luz recibida.

Para resumir, la precisión en este tipo de sistema de triangulación depende de:

- La resolución del sensor
- La calidad de las lentes
- Calidad del haz láser y estado superficial de la pieza
- La coordinación entre la emisión y la recepción de los datos
- La calibración y cuantificación del error del sistema.

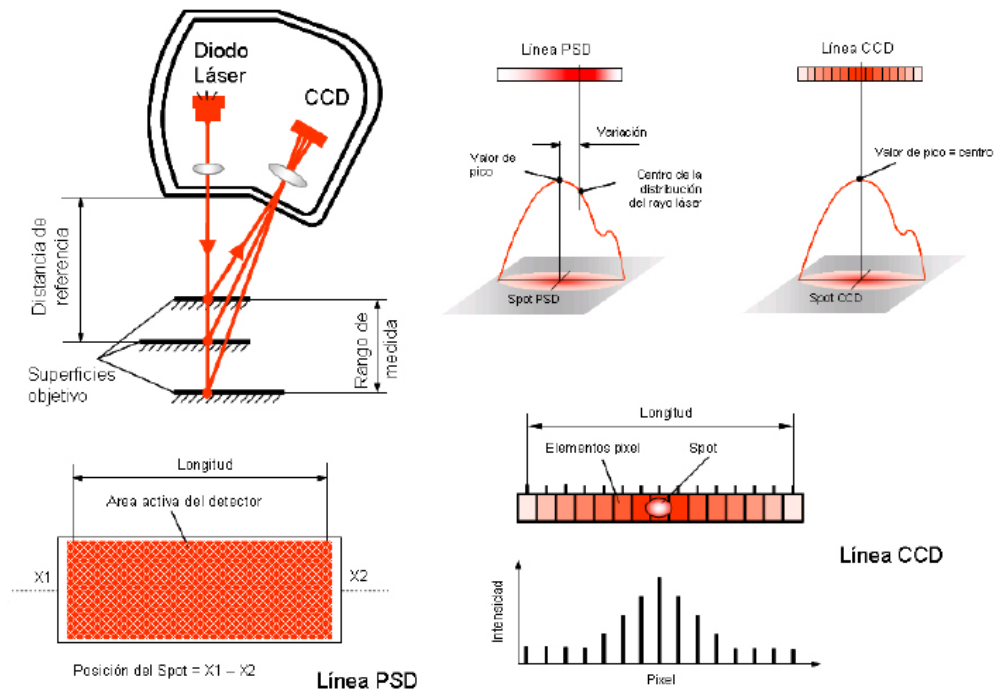


Ilustración 19: Diagrama Sensores triangulación

2.4. BATERÍAS

Las baterías son un componente que consta en el almacenaje de la electricidad. Es un acumulador que está compuesto por una o más celdas electroquímicas que pueden convertir la energía acumulada en electricidad. Cada una de estas celdas tiene un electrodo positivo y uno negativo que permiten el flujo de iones entre ellos.

Analizamos algunos aspectos principales de las baterías:

- Ciclo: Entendemos por ciclo la carga y descarga de una batería a cualquier porcentaje. La cantidad de descarga comparada a cuando está llena determina la necesidad para una carga pequeña, moderada o deep cycle. A esto se le llama la profundidad de descarga de la batería (DOD) y es medida en porcentaje.
- Tipos de ciclos: existen tres tipos, pequeño moderado y profundo. El ciclo pequeño ocurre cuando solo un pequeño porcentaje del total de la capacidad de la batería es descargado, los ciclos moderado y profundo (deep) es donde las baterías son descargadas a un mayor porcentaje del total de la capacidad de la batería respectivamente.
- Ciclo de vida: El ciclo de vida de una batería se puede ver influenciado por muchos factores como pueden ser el mantenimiento, el porcentaje de descarga, temperatura de la batería, cantidad de veces que se descarga etc.
- Tipos de carga: En función del tipo de requerimiento que tengamos podemos cargar las baterías a diferentes niveles. Podemos diferenciar entre dos tipos.
 - Carga lenta: este tipo de baterías se llevan a cabo en cargadores re-lativamente simples y no se debe perjudicar en el sobrecalentamiento de la batería. Cuando la carga de la batería se haya completado hay que desconectar el cargador. El tipo de baterías que se ve menos afectado por las sobrecargas son las del tipo Níquel Cadmio. Las baterías de plomo son algo menos robustas y las baterías de plomo ácido tienen que dejar reposarse o mantener una tensión constante por debajo del punto de gasificación. En cambio, las NiMH es mucho más fácil que se estropeen al ser sometidas a una carga lenta prolongada.
 - Carga rápida: este tipo de carga requieren cargadores más complejos. A medida que aumenta el nivel de carga también se ve incrementado los riesgos de sobrecarga y sobrecalentamiento de la batería.

Las tasas típicas se muestran a continuación:

- Carga lenta = toda la noche de carga a una velocidad de 14-16 0.1C
- Carga rápida = 3 a 6 horas de carga a una velocidad de 0,3 C
- Carga súper rápida = Menos de 1 hora a una velocidad de carga 1.0C

- Carga de baterías: a la hora de cargarlas baterías tenemos que disponer de un cargador adecuado para así llevar al máximo la vida útil de estas.

Especificaciones:

- Cold Cranking Ampere (CCA): La cantidad de corriente (amp) que una batería a -17.8 grados centígrados puede proporcionar por 30 segundos
- Marine Cranking Ampere(MCA) La cantidad de corriente descargada de una batería probada a 0 grados centígrados por 30 segundos
- Capacidad de Reserva(RC): La cantidad de tiempo que una batería puede entregar X amp a 0 grados centígrados
- Amperios Hora (Ah): Probada a 26 grados centígrados, es la cantidad de corriente (en amp) que una batería puede entregar multiplicada por la cantidad de horas. La mayoría de las baterías deep cycle están marcadas a un rango de 20 horas. Una batería de 100 Ah puede entregar 5 amp por 20 horas. Un amperio hora es una unidad de carga eléctrica y se abrevia como Ah. Indica la cantidad de carga eléctrica que pasa por los terminales de una batería, si ésta proporciona una corriente eléctrica de 1amperio durante 1 hora. El amperio-hora representa la cantidad de electricidad que, en una hora, atraviesa un conductor por el que circula una corriente continua de 1 A (1 Ah = 3600 Culombios). Se emplea para evaluar la capacidad de una batería, es decir la cantidad de electricidad que puede almacenar durante la carga y devolver durante la descarga.

Principio de funcionamiento de las baterías:

El principio de funcionamiento de un acumulador está basado esencialmente en un proceso químico reversible llamado reducción-oxidación (también conocida como redox), un proceso en el cual uno de los componentes se oxida (pierde electrones) y el otro se reduce (gana electrones); es decir, un proceso cuyos componentes no resulten consumidos ni se pierdan, sino que meramente cambian su estado de oxidación y, que a su vez pueden retornar a su estado original en las circunstancias adecuadas.

Tipos de baterías:

- Baterías de Níquel-Hidruro Metálico. Creadas en los años 70 pero introducidas recientemente en el mercado para sustituir a las de Níquel-Cadmio. Mayor capacidad de almacenamiento por unidad de peso respecto a las de plomo, sin embargo, tienen también el efecto memoria. A pesar de ello han sido de las más utilizadas por los coches híbridos.



Ilustración 20: Batería Níquel-Hidruro Metálico

- Baterías de Ion de Litio: Se conocen desde 1960, su desarrollo se debe sobre todo a la telefonía móvil ya que almacenan mucha energía. Presentan un alto voltaje por celda (cada unidad proporciona 3,6 voltios). Carecen de efecto memoria. Su descarga es lineal, es decir, que durante toda la descarga el voltaje de la batería apenas varía, lo que evita la necesidad de circuitos reguladores. (Se debe tener en cuenta que esto puede ser una desventaja en algunos casos, ya que hace difícil averiguar el estado de carga de la batería.) Las desventajas de estas baterías de litio son: Independientemente del uso, sólo tienen una vida útil de 3 años. Se pueden cargar entre 300 y 600 veces, menos que una batería de Ni-Cd o Ni/MH. Son más caras, pero el precio se ha ido acercando rápidamente al de las otras tecnologías. Están fabricadas con materiales inflamables (pueden explotar o incendiarse). Necesitan de un sistema electrónico para controlar en todo momento la batería y evitar los inconvenientes citados.



Ilustración 21: Baterías Ion Litio

- Baterías Litio-Polímero. Se empezaron a producir sobre el 2006 por lo que aún están en desarrollo. Son una variante de las anteriores, pero cambian el electrólito por un polímero que puede ser sólido o gelatinoso, permite dar formas a gusto del fabricante. Razón por la cual están muy interesados en ellas los fabricantes para tener mayor libertad en el diseño. Densidad de almacenamiento mayor que las de Ion de litio. Almacenan casi el doble de energía por el mismo peso. Se vuelven inestables si se sobrecargan o se descargan por debajo de un mínimo.
- Baterías Zebra. Son Baterías de Alta temperatura. Su electrólito tiene que estar a 250-350°C. Por lo que se aíslan del exterior generalmente al vacío. Densidad de almacenamiento similar a las de Ion de Litio, pero pudiendo trabajar a altas tensiones (hasta 600V). El número de ciclos es de 1000 aproximadamente. Pero se cargan hasta el 50% de la carga en unos 30min solamente.
- Baterías de Gel y las AGM: Las baterías de uso más común son de electrólito líquido. Hay otro tipo, llamadas "secas". No hay electrólito en estado fluido. Está inmobilizado. Estas baterías normalmente no emanan gases, por lo que no existe peligro de corrosión. Hay 2 formas de inmobilizar el electrólito: Volviéndolo gelatina (Gel). Usando un separador de fibra de vidrio con gran capacidad de absorción o AGM (Absorbed Glass Mat). El proceso de carga puede desprender gases. Para evitarlo se comenzará con una corriente constante si la batería está descargada, y al final del proceso de carga se pasa al método de voltaje constante, hasta un voltaje definitivo de 13,6 V.

- **Baterías Deep Cycle o de ciclo profundo.** Baterías que tienen la capacidad de descargarse completamente cientos de veces. La de un automóvil convencional solamente es capaz de descargarse completamente menos de 50 veces. Varias aplicaciones tales como: náutica, autocaravanas, energías renovables, casas de campaña, iluminación, coches de golf, silla de ruedas, plataformas elevadoras, maquinaria industrial, etc.

Tras analizar todos los tipos de baterías, la solución óptima parecen ser las baterías de Ion de Litio ya que se trata de una tecnología suficientemente desarrollada, efectiva y relativamente barata, además de fácil de implementar, ya que por su reducido tamaño beneficiara al no añadir mucho peso al dron.

A la hora de realizar el cálculo de la capacidad de una batería hay que tener en cuenta 2 cosas. El pico máximo de intensidad en el caso más desfavorable que pueden pedir todos los componentes del sistema. Y el consumo medio del sistema. Una vez se tienen estos dos datos se elige la batería deseada dependiendo de la autonomía que deseemos tener.

Hay que tener en cuenta el nivel de descarga profunda de la batería por lo que esta no debería ser del valor exacto de nuestro consumo por hora. Ya que en ese caso se quedaría inutilizada. En el caso de las baterías de Ion-Litio este valor está en el 80%.

2.5. COMUNICACIÓN INALÁMBRICA

A la hora de interactuar con el entorno o con el usuario hay que valorar las diversas técnicas inalámbricas ya que por nuestro diseño no encajaría un sistema de comunicación con cable.

- Bluetooth (Ruiz, Vásquez, & Londoño, 2004):

Es un protocolo de comunicaciones inalámbrico de corto alcance y bajo consumo de potencia en la banda ICM de 2,4 GHz que soporta tanto tráfico de datos como de audio. Su enlace es tan altamente confiable que hace de la tecnología una de las más aptas para cualquier tipo de aplicación en comunicaciones digitales, ya que habilita mecanismos de detección de error, ofrece una inmunidad natural a la interferencia empleando la técnica de espectro ensanchado por salto de frecuencia FHSS a 1600 saltos por segundo y habilita procesos de encriptación para garantizar comunicaciones fiables y seguras.

En ambientes industriales es común la monitorización de muchos parámetros eléctricos o mecánicos donde Bluetooth puede formar una red de sensores e instrumentos de medida eliminando las conexiones físicas entre éstos y un centro de captura de datos. A tal red se le conoce dentro de Bluetooth como piconet. También permitiría la conexión, monitoreo y programación de controladores lógicos programables PLCs, RTUs, y puntos de campo instalados en líneas o plantas de producción.

El funcionamiento del protocolo Bluetooth es muy similar al modelo OSI de 7 capas conocido en la Informática.

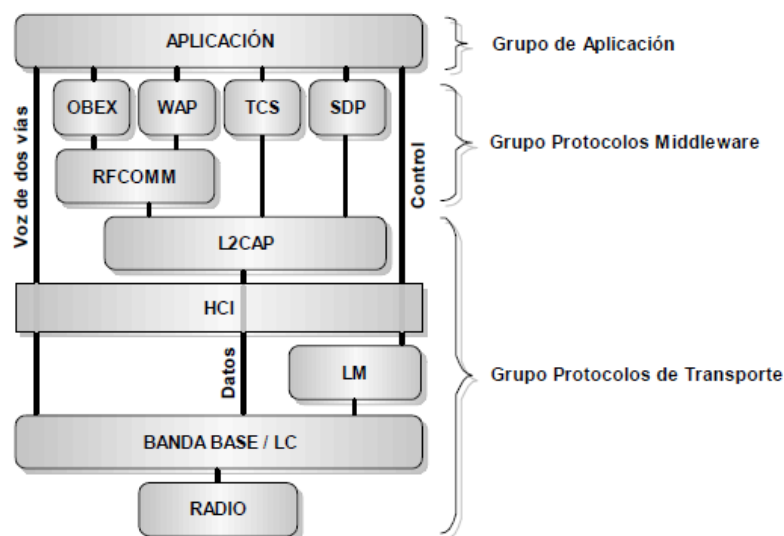


Ilustración 22: Modelo OSI de 7 capas

La función de cada capa se resume como sigue:

- Radio: Modula y demodula los datos para la transmisión y recepción a través del aire.
- Banda base y controlador de enlace (LC): Controlan los enlaces físicos vía radio, ensamblando paquetes y generando el salto de frecuencia.
- Manejador de enlace (LM): Controla y configura los enlaces con otros dispositivos.
- Interfaz controladora de host (HCI): Lleva las comunicaciones entre un módulo Bluetooth y un host separados, permitiéndole a este último acceder a las capacidades de hardware del módulo.
- Protocolo de adaptación y enlace lógico (L2CAP): Distribuye y acondiciona el tamaño de paquetes para las capas altas.
- RFCOMM: Suministra una interfaz serial similar al RS232.
- Protocolo de descubrimiento de servicio: Permite descubrir los servicios brindados por otros dispositivos.
- Protocolo de control de telefonía (TCS): Suministra servicios de telefonía.
- OBEX, WAP: Suministra otros protocolos de comunicación a las capas altas de ser requerido.
- Aplicación: Programa que hace uso del protocolo Bluetooth en una forma determinada.

- Infrarrojos (González & Miguel, 2010):

Los enlaces infrarrojos se encuentran limitados por el espacio y los obstáculos. El hecho de que la longitud de onda de los rayos infrarrojos sea tan pequeña (850-900 nm), hace que no pueda propagarse de la misma forma en que lo hacen las señales de radio.

Es por este motivo que las redes infrarrojas suelen estar dirigidas a oficinas o plantas de oficinas de reducido tamaño. Algunas empresas, van un poco más allá, transmitiendo datos de un edificio a otro mediante la colocación de antenas en las ventanas de cada edificio. Por otro lado, las transmisiones infrarrojas presentan la ventaja, frente a las de radio, de no transmitir a frecuencias bajas, donde el espectro está más limitado, no teniendo que restringir, por tanto, su ancho de banda a las frecuencias libres.

Teniendo estas tecnologías en cuenta vemos que la más indicada para nuestro Dron podría ser la tecnología Bluetooth ya que no le afecta tanto los obstáculos ni la distancia como a los infrarrojos.

- Wi-Fi

La tecnología WiFi está basada en el conjunto de estándares IEEE 802.11 para redes locales inalámbricas que especifican una interfaz "aérea" entre clientes inalámbricos y una estación base o punto de acceso. Como estas especificaciones fueron creadas para usarse en redes locales y operar en bandas de frecuencia de uso libre, tienen un bajo consumo de potencia y un rango de cobertura relativamente corto. La distancia depende de las obstrucciones, materiales de construcción y de la línea de vista.

Las redes 802.11 operan con el protocolo CSMA/CA (Acceso Múltiple a la Portadora con prevención de colisiones) para minimizar las colisiones causadas por las transmisiones simultáneas de múltiples radios. Este protocolo es similar al usado en las redes locales Ethernet y asume que ninguna estación comenzará a transmitir a no ser que haya línea de vista.

Esta tecnología soluciona los siguientes problemas que tienen las otras:

- La transmisión por radio y por infrarrojos es sensible a ruidos e interferencias por lo que no resulta muy fiable
- La potencia de las transmisiones varía a lo largo del tiempo y del espacio debido a efectos de desvanecimiento provocados por la propagación multitrayecto y accidentada debida a la existencia de barreras físicas y a la topografía del terreno. En consecuencia, la cobertura no resulta consistente ni predecible.
- En el caso de la transmisión por radio, la señal transmitida no se puede limitar dentro de un área específica por lo que las señales pueden ser interceptadas (o generar interferencias)
- El espectro es finito y debe ser compartido con otros usuarios y dispositivos.
- También para el caso de transmisión por radio, la limitación del espectro hace difícil conseguir las altas velocidades de transmisión fácilmente alcanzadas mediante medios cableados.

- El espectro de radio se ha regulado tradicionalmente de forma diferente por los distintos gobiernos, por lo que puede ser difícil diseñar productos orientados a un mercado global.

2.6. GPS DIFERENCIAL

El GPS Diferencial introduce una mayor exactitud en el sistema. Ese tipo de receptor, además de recibir y procesar la información de los satélites, recibe y procesa, simultáneamente, otra información adicional procedente de una estación terrestre situada en un lugar cercano y conocido por el receptor. Esta información complementaria permite corregir las inexactitudes que se puedan introducir en las señales que el receptor recibe de los satélites. En este caso, la estación terrestre transmite al receptor GPS los ajustes que son necesarios realizar en todo momento, éste los contrasta con su propia información y realiza las correcciones mostrando en su pantalla los datos correctos con una gran exactitud.

El margen de error de un receptor GPS oficialmente está en 15m. En realidad, un GPS portátil monofrecuencia de 12 canales paralelos ofrece una precisión de entre 2,5 y 3 metros en más del 95% del tiempo. Para un desplazamiento normal por tierra 15m o 3m metros de diferencia no debe ocasionar ningún problema, pero para realizar la maniobra de aterrizaje de un avión, sobre todo si las condiciones de visibilidad son bajas, puede llegar a convertirse en un desastre. Sin embargo, el GPS Diferencial reduce el margen de error a menos de un metro de diferencia con la posición indicada.

El único inconveniente del GPS Diferencial es que la señal que emite la estación terrestre cubre solamente un radio aproximado de unos 200 kilómetros. No obstante, ese rango es más que suficiente para realizar una maniobra de aproximación y aterrizaje de un avión a un aeropuerto. Como nuestro sistema va a estar a mucha menos distancia, este inconveniente no nos afecta en absoluto.

Existen también receptores GPS mucho más sofisticados que funcionan recibiendo múltiples señales de radiofrecuencia. En esos dispositivos el margen de error no sobrepasa los 25 centímetros

En nuestro caso nuestro GPS de estación terrestre será un GPS en el coche.

2.7. ELECCIÓN DE COMPONENTES

Se crearán 2 dispositivos:

- Para el Dron:
 - Procesador: ESp32
 - Gps
 - Cámara de captación de imagen.
- Para el Coche
 - Procesador: ESp32
 - Gps
 - Pantalla

Se va a usar un Sistema de GPS diferencial.

Se va a usar el kit de desarrollo ESP32 WROVER KIT Para el desarrollo del GPS Diferencial y del controlador de imagen y del dron. Viene con todo lo necesario para realizar la comunicación por wifi entre el dispositivo que iría en el coche y el dispositivo que iría en el dron.

Mejora con respecto al ESP8266:

- WiFi más rápida - soporta la velocidad HT40 (144,4 Mbps) y tiene una nueva arquitectura de RF simplificada
- Bluetooth Low Energy and Classic
- Procesador de doble núcleo - procesadores 2x Tensilica L108 velocidad de reloj de hasta 160 MHz
- Mejoras de modo de baja potencia - conversiones ADC, umbrales de nivel, etc. ahora se pueden activar un modo sleep profundo
- Periféricos - touch capacitivo, ADC, DAC, I2C. UART, SPI, SDIO, I2S, RMII, PMW, etc... pero no USB.
- Más RAM - ~ 400 KB de RAM en el chip
- Seguridad - Aceleración hardware AES y SSL.
- API simplificado - No hay muchos detalles proporcionados aquí, excepto API WiFi se simplificará, sin embargo, mantienen una buena flexibilidad y control.

Dispondrá de cerca de 40 GPIO, soporte para IPV4 e IPV6 y por un precio no mucho más caro que el ESP8266.

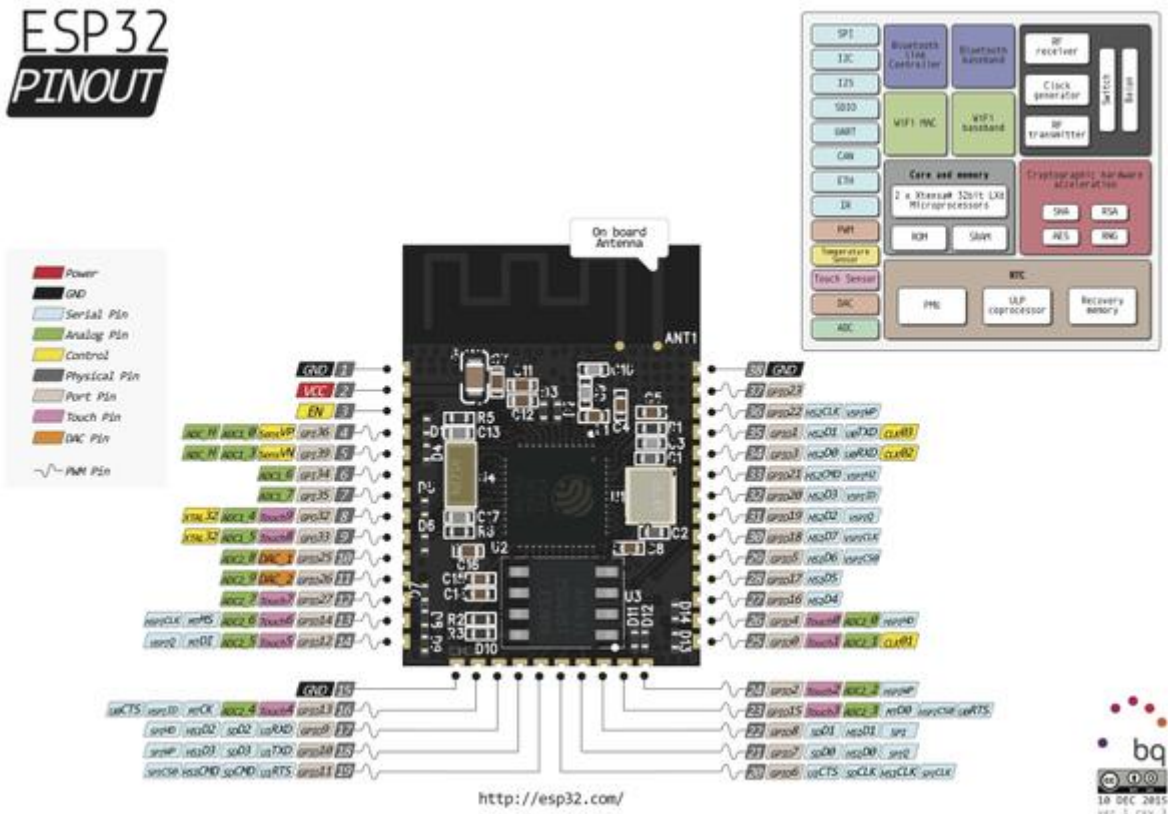


Ilustración 23: Pines ESP32



Ilustración 24: Placa ESP32-WROOM

Tras el gran éxito que obtuvo la empresa *Espressif Systems* con el módulo de bajo coste ESP8266, destinado al mundo IoT (Internet of Things), un par de años después le llega el turno a un nuevo sistema, el ESP32 que, al igual que el ESP8266, está enfocado en el desarrollo de aplicaciones y productos relacionados con el IoT, con la diferencia de que, manteniendo un precio reducido (a fecha de publicación de la entrada, en Aliexpress se puede conseguir la placa de desarrollo Nodemcu con SoC ESP32 por 7.50 euros), va un paso más allá que el ESP8266, con mayores y mejores características, nuevas capacidades (*Bluetooth Low Energy*) y mejoras en los aspectos en los que su antepasado flaquea (la cantidad de pines/interfaces y el bajo consumo).

El ESP32 es un SoC (System on Chip) que integra el procesador de 32 bits, Tensilica LX6, un doble núcleo que trabaja en modo normal a 160MHz (pudiendo alcanzar los 240MHz), es decir el doble de velocidad que el ESP8266. Este nuevo SoC se caracteriza por integrar, no solo la pila (Stack) de comunicación Wi-Fi con una mejora en el aspecto de seguridad (encriptación criptográfica), sino que añade una pila (Stack) Bluetooth Low Energy (BLE, 4.1) que abre el abanico de posibilidades ya que permite implementar sobre ella diversos perfiles (Profiles) que van más allá de la típica comunicación serie por bluetooth (perfil SPP), permitiendo utilizar perfiles de transmisión de audio, de pasarela (Gateway) Bluetooth-WiFi, o de implementación de dispositivos HID (interfaces hombre-máquina), ya sean periféricos existentes como ratones, teclados o gamepads, o cualquier tipo de dispositivo de control que se nos ocurra.

Como hemos dicho, además de las mejoras en las características y la capacidad Bluetooth, el ESP32 presenta un mayor número de pines GPIO, que el ESP8266, así como más interfaces de comunicación y periféricos (I2C, SPI, UART, ADC, DAC, CAN, MMC, Ethernet...), por ejemplo, una novedad a mencionar sería la interfaz CAN (Controller Area Network), un bus de comunicaciones para redes distribuidas, desarrollada por Bosch, y que en la actualidad se encuentra muy extendida.

El nuevo ESP32 ha sido desarrollado tomando como base de partida las características y funcionalidades del ESP8266, mejorando las capacidades y resolviendo aquellos problemas y desventajas, que presentaba el anterior módulo, referidos a la orientación como dispositivo enfocado en el IoT. Así, tenemos que el ESP32 consigue unas prestaciones de bajo consumo muy destacables, permitiendo desarrollar productos portables de larga duración de batería gracias a su característica de ultra bajo consumo. Entre los distintos modos de bajo consumo existentes, el más destacable es el modo de bajo consumo profundo (deep sleep), el cual mantiene un consumo de corriente de 25µA mientras permite seguir realizando lecturas de los diversos sensores que tenga conectado el módulo, gracias al llamado co-procesador de ultra bajo consumo, ULP (Ultra-Lower-Power Co-processor).

La seguridad que muestra Espressif Systems por su nuevo módulo ESP32 se encuentra muy fortalecido gracias al éxito que obtuvo el anterior ESP8266 y esto se ve reflejado en el soporte presente en este nuevo producto, de este modo, podemos encontrarnos con una buena documentación, en inglés, relacionada con el módulo (recordemos que cuando el ESP8266 vio la luz, la

mayoría de documentación era escasa y se encontraba únicamente en chino), así como un avanzado SDK que permite sacarle el máximo partido al módulo, el llamado ESP-IDF.

Al contrario que con el ESP8266, el cual salió en primera instancia con un solo módulo con bastantes limitaciones y desventajas (ESP-01), el ESP32 se ofrece de manera oficial a través de dos placas de desarrollo que cumplen con todas las necesidades que se pueden esperar de una placa de desarrollo. Por un lado, nos encontramos con el ESP32-DevKitC, una placa simple que permite acceder a la mayoría de características que ofrece el ESP32. Por otro lado se encuentra el ESP-WROVER-KIT, un completo kit de desarrollo que ofrece todo lo necesario para probar absolutamente todas las características que el módulo ofrece. De manera no oficial, se pueden encontrar multitud de placas de desarrollo con una gran variedad de precios, siendo una de las más reconocible, la Nodemcu (que también estaba disponible para el SoC ESP8266).

Nosotros usaremos el montaje ESP-WROOM-32 con las siguientes características:

- Voltaje de alimentación: 3.3V DC
- Corriente de Operación: 80mA (fuente superior a 500mA)
- Voltaje lógico (Entradas/Salidas): 3.3V
- SoC: ESP32 (ESP32-D0WDQ6)
- CPU: Dual core Tensilica LX6 (32bit)
- Frecuencia de Reloj: 240MHz
- SRAM: 520KB
- Memoria Flash Externa: 4MB
- Pines Digitales GPIO: 34 (Incluyendo todos los periféricos)
- Wi-Fi, Protocolo 802.11 b/g/n/e/i (802.11n hasta 150Mbps)
- Wi-Fi, Seguridad WPA/WPA2/WPA2-Enterprise/WPS
- Protocolos de Red IPv4, IPv6, SSL, TCP/UDP/HTTP/FTP/MQTT
- Bluetooth

3. DESARROLLO

El sistema se compondrá de 2 dispositivos principales:

Uno de ellos estará situado en el coche. El funcionamiento de este dispositivo viene explicado por el siguiente diagrama de actividades UML:

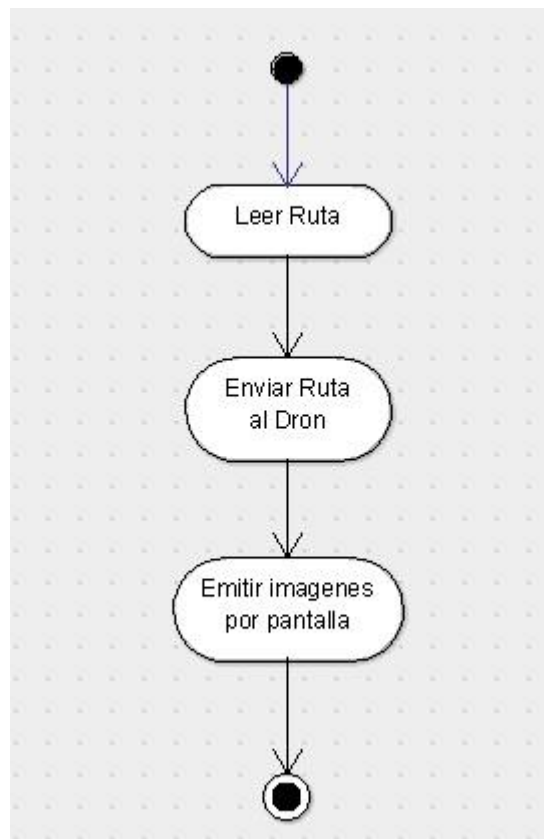


Ilustración 25: UML Coche

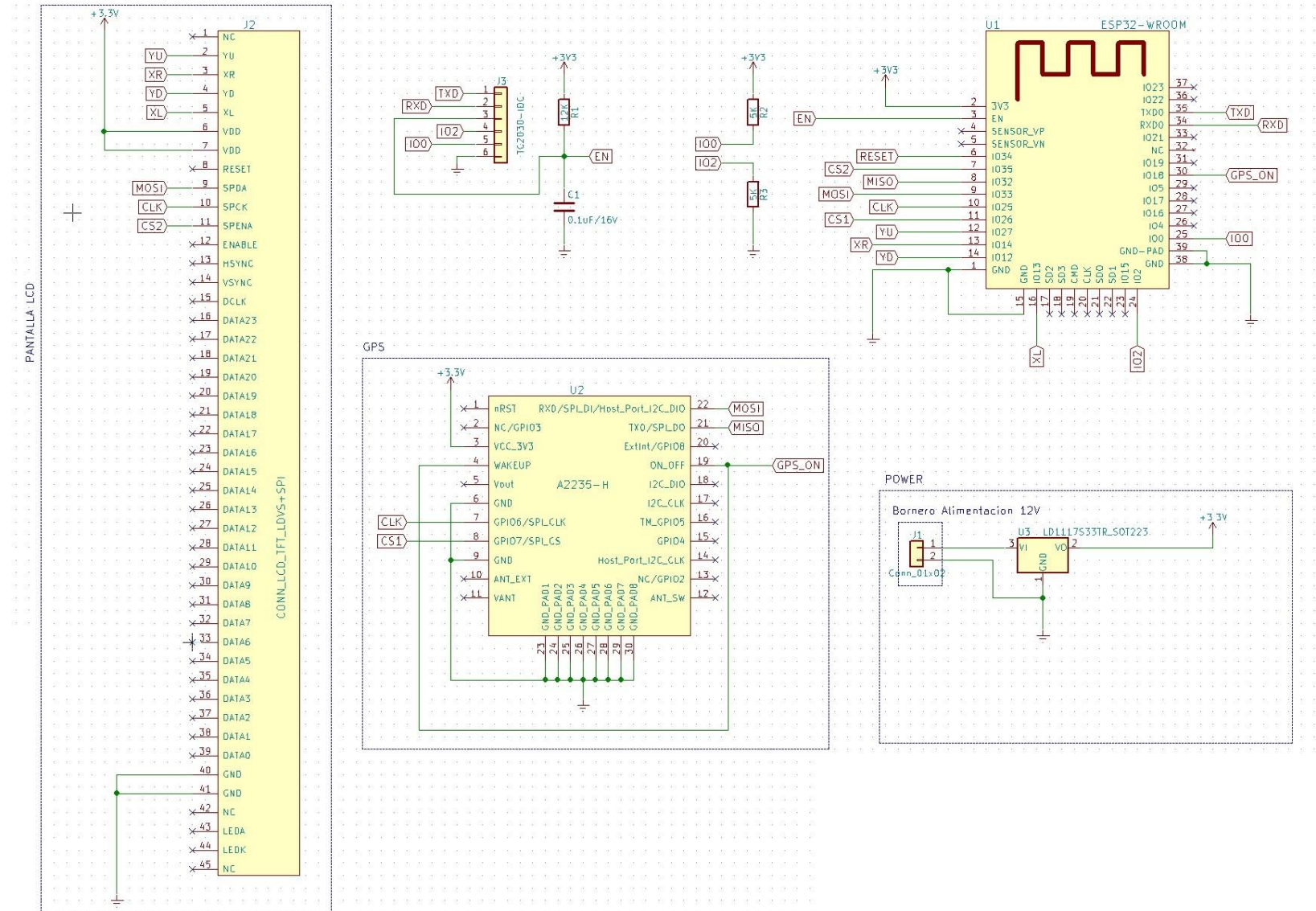
Su principal función será establecer un wifi accesspoint al que se enviará la ruta gps. Además, se ocupará de emitir por una pantalla LCD las imágenes captadas por la cámara del dron. Todo esto se encargará de hacerlo un controlador ESP32-WROOM.

Para mostrar las imágenes se usará una pantalla de 9,8" TFT-LCD del fabricante CPT.

Además, irá conectado a la toma de 12V del coche por lo que necesitará un regulador de tensión LD1117S33.

Para controlar la ubicación GPS del coche se usará un receptor GPS A2235-H.

El conexionado de dichos componentes será el que muestra el esquema 1



Esquema 1

El segundo dispositivo será el dron en sí. El funcionamiento de este segundo dispositivo viene especificado por los siguientes diagramas de actividades UML:

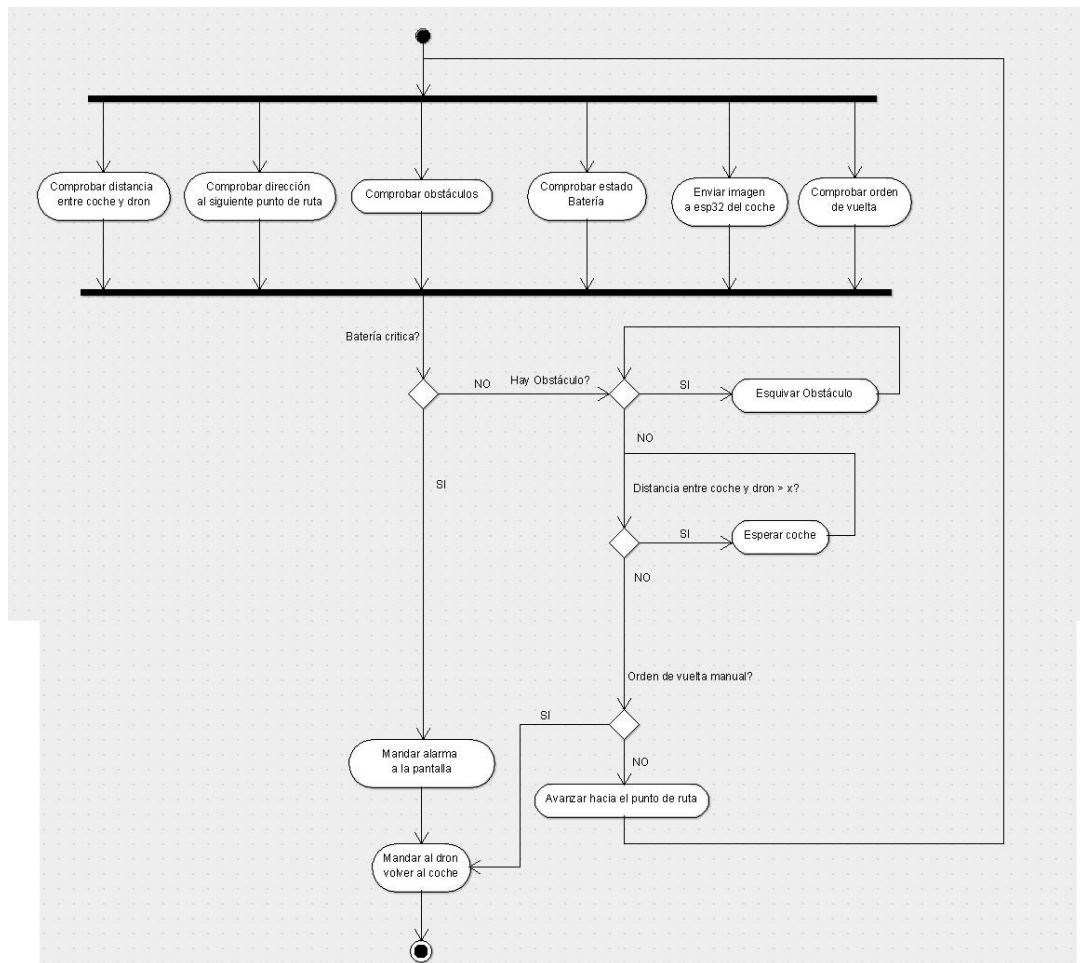


Ilustración 26: UML General Dron

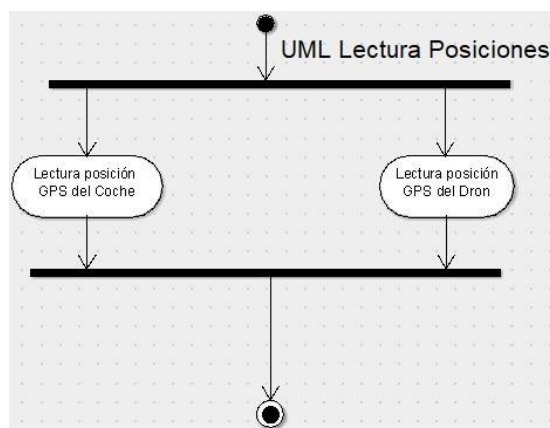


Ilustración 27: UML Lectura Posiciones

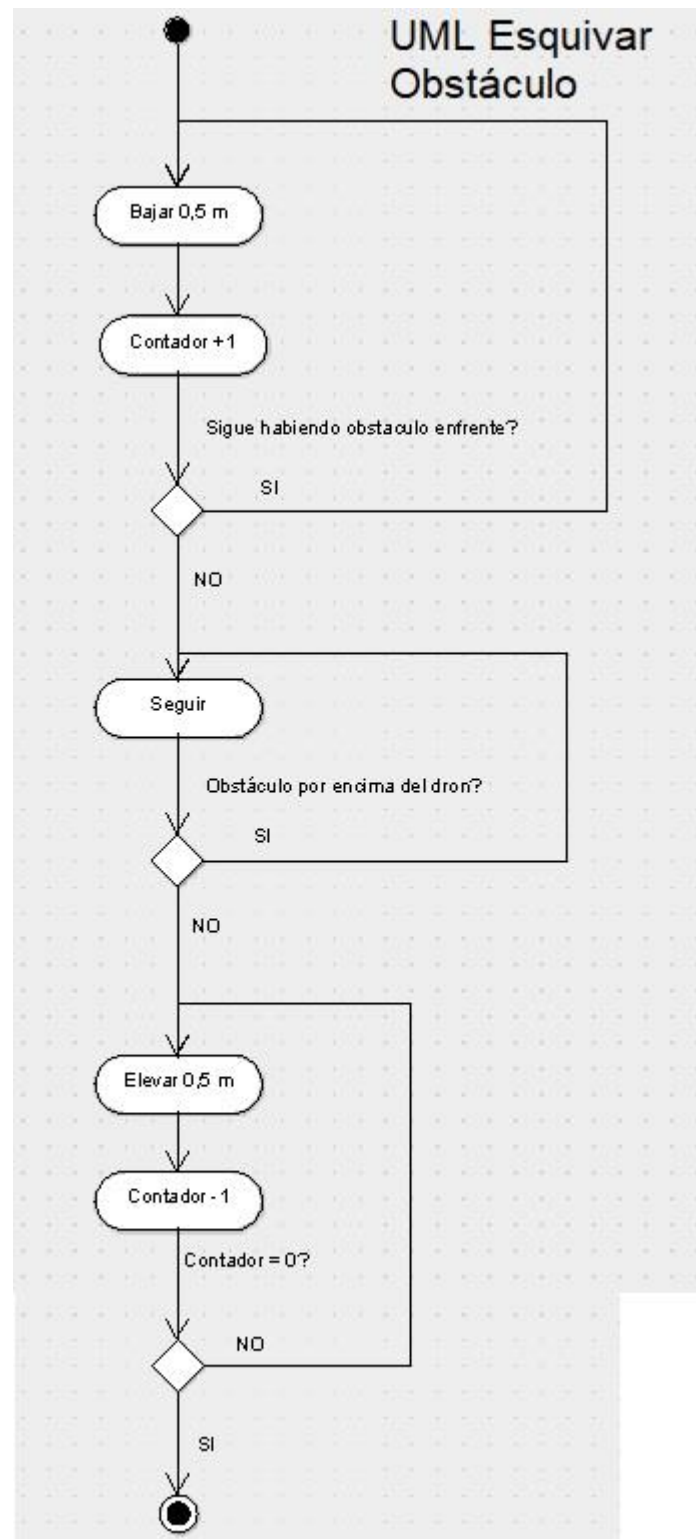


Ilustración 28: UML Esquivar Obstáculo

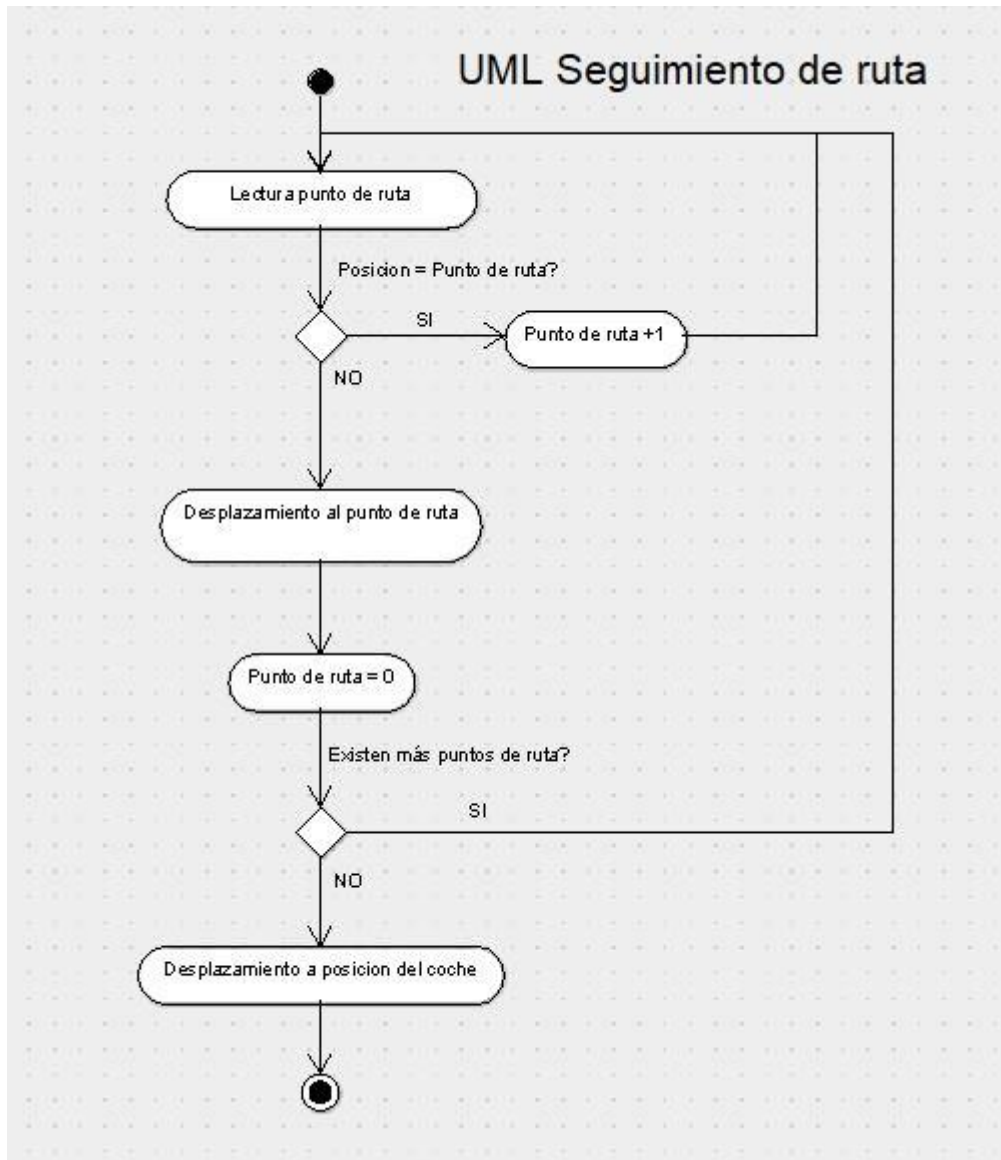


Ilustración 29: UML Seguimiento Ruta

Se ocupará de seguir la ruta sin alejarse demasiado del coche y de esquivar los obstáculos que se encuentre mientras vuela. Todo ello mientras capta con la cámara lo que viene por delante en el camino y lo envía al dispositivo del coche. Todo esto será gestionado por el controlador ESP32-WROOM.

Para la detección de los obstáculos usarán sensores de ultrasonidos HC-SR04. Dado que necesitamos detectar obstáculos tanto por arriba como por el frente, así como controlar la altura a la que estamos necesitaremos en total 3 sensores.

Para la captación de imagen usaremos un módulo de cámara ArduCAM-Mini-5MP-Plus. Que lleva una cámara OV5632 con una interface SPI.

Dicha cámara ira montada con un servo MG90S para así poder corregir el ángulo de captación durante la aceleración y deceleración del mismo. Para ello se ayudará de un chip LSM9DS1 que va montado en un capsulado LGA-24L. Dicho chip tiene las funciones de acelerómetro, giroscopio y magnetómetro.

Se controlará la posición GPS del coche con un receptor GPS A2235-H.

El sistema dispondrá de una batería de lipo cuya capacidad está calculada en el apartado 3.1.4. Dicha batería será recargable conectando el dron a la toma de 12V del coche. Este proceso de carga irá controlado por el chip MAX1873SEEE.

Para la alimentación de los componentes del sistema se usarán también 2 fuentes conmutadas. Para los componentes alimentados a 3,3V el LTC3621-3.3 y para los componentes alimentados a 5V el LTC3621-5.

Los rotores Suppo A2212/13 irán controlado cada uno con su ESC 30A correspondiente con unas aspas GWS HD 10x6.

Debemos comprobar si este rotor nos da suficiente potencia para mantener en vuelo nuestro dron. Para ello tendremos que calcular primero el peso total del mismo. En la lista de componentes en los anexos podemos ver el peso de cada componente. Para el cálculo del peso hemos supuesto un peso de batería de 435g. El bastidor del dron tendrá un peso de 400g y el resto de componentes (tornillos, cableado etc) tendrá un peso de unos 50g. Lo que nos da un peso total del dron de aproximada mente 1265g. Normalmente por seguridad se establece que los rotores deben ser capaces de producir un impulso del doble del peso total del dron.

$$\text{Empuje necesario por rotor} = \frac{\text{Peso del Dron} \cdot 2}{\text{N}^{\circ} \text{ Rotores}} \text{ (ecuación 11)}$$

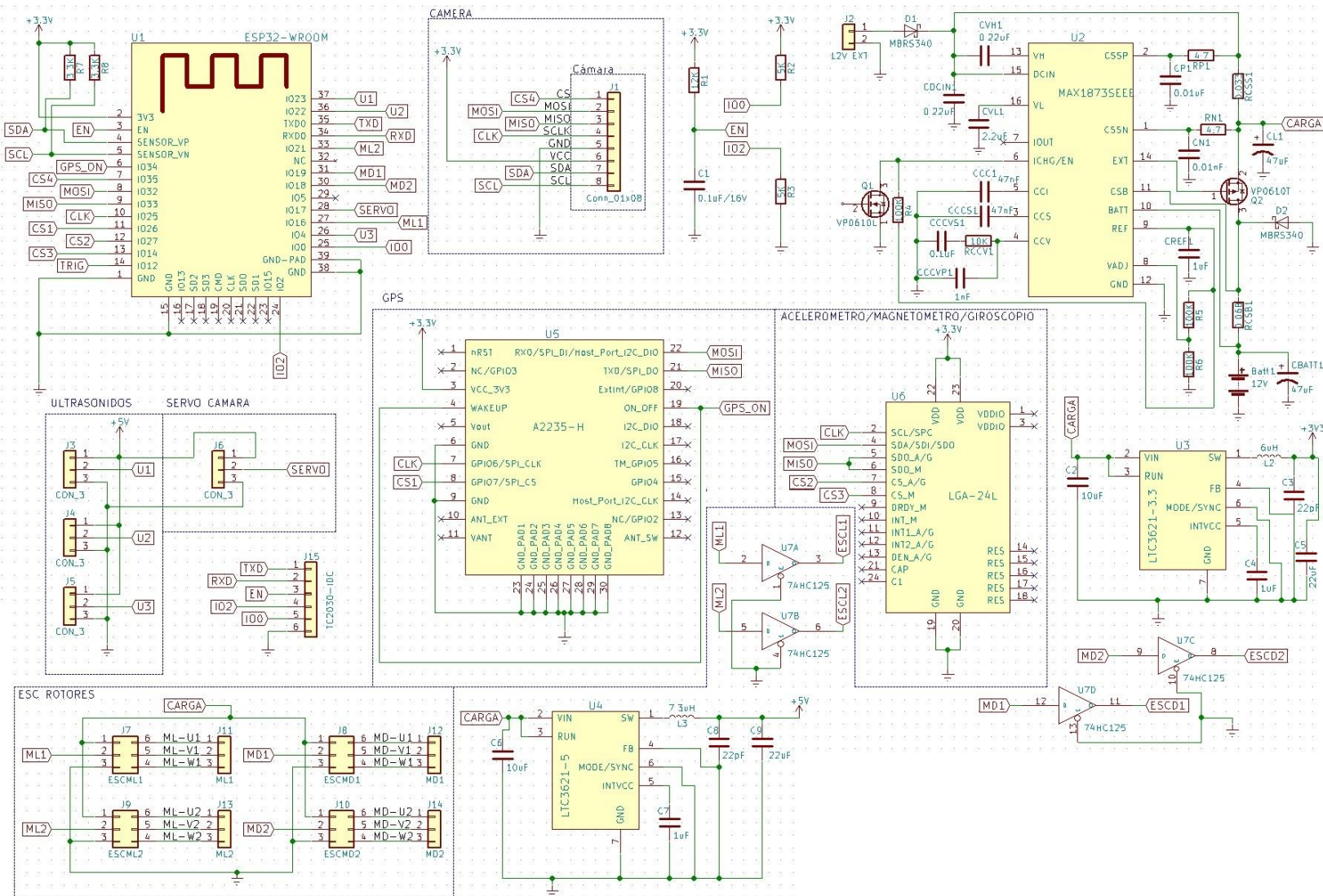
$$\text{Empuje necesario por rotor} = \frac{1265 \cdot 2}{4} \text{ (ecuación 12)}$$

$$\text{Empuje necesario por rotor} = 632.5g \text{ (ecuación 13)}$$

Viendo la tabla siguiente (y con ayuda de una regla de tres) proporcionada por el fabricante vemos que es capaz de proporcionar ese empuje con esas aspas cuando se le proporciona al motor una corriente de 10.35A

Propeller	Gear Ratio	Volts	Amps	Watts	RPM	Speed (mph)	Thrust (g)	Thrust (oz)	RPM as % of Kv*V
GWS HD 10x6	1	6.9	7.2	49	5610	31.9	424	14.96	75%
GWS HD 10x6	1	7.9	8.7	68	6180	35.1	526	18.55	72%
GWS HD 10x6	1	8.9	10.1	89	6690	38.0	617	21.76	70%
GWS HD 10x6	1	9.9	11.7	115	7200	40.9	722	25.47	67%
GWS HD 10x6	1	10.9	13.25	144	7680	43.6	817	28.82	65%

El conexionado de todos estos componentes se hará tal y como se muestra en el esquema 2



Esquema 2

3.1. CÁLCULOS

Para la realización del esquema electrónico y correspondiente pcb ha sido necesario realizar los siguientes cálculos. Estos cálculos los separaremos en distintos apartados dependiendo del componente (chip) al que afectan principalmente.

3.1.1. MAX1873SEEE

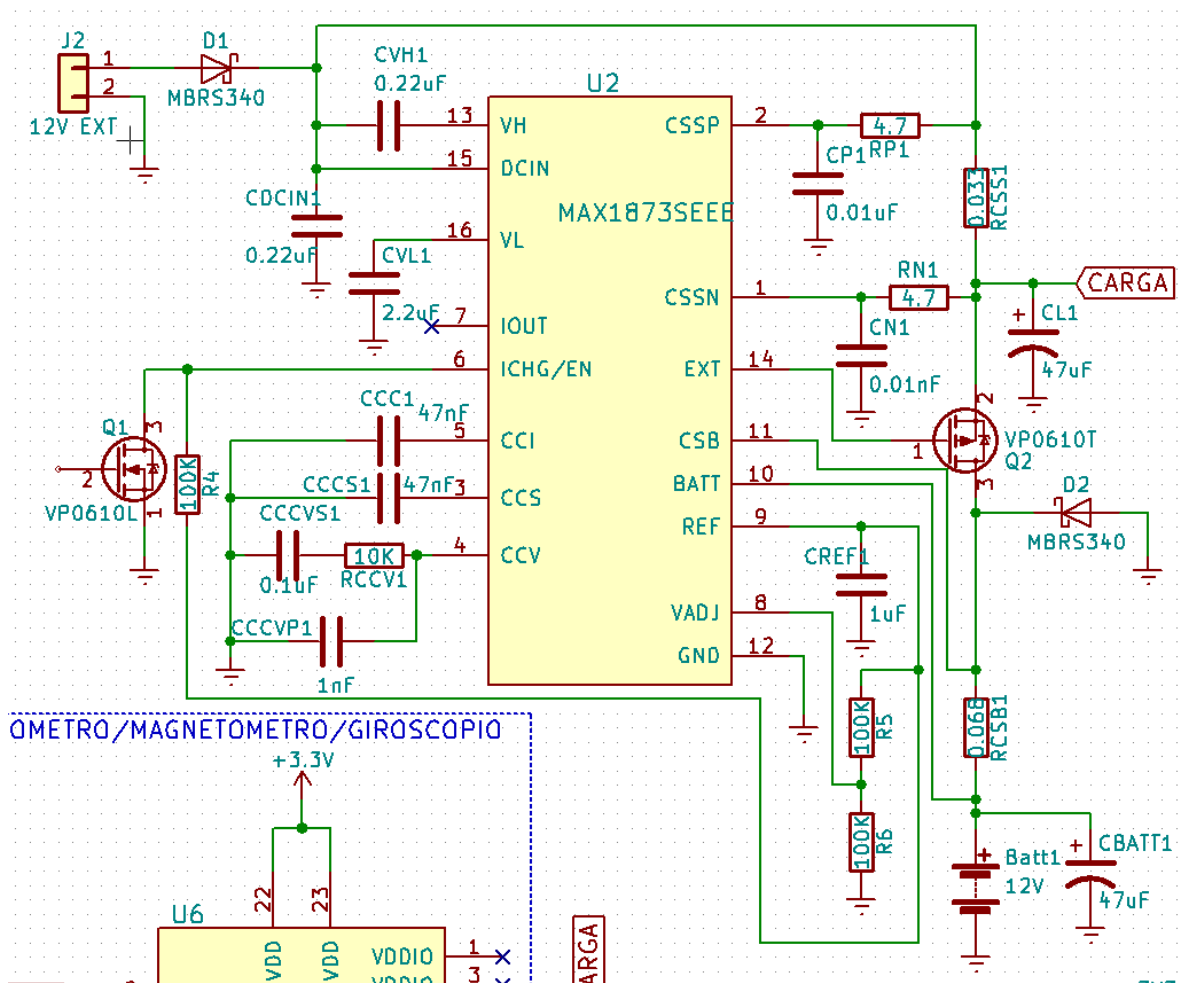


Ilustración 30: chip MAX1873SEEE

El condensador C_{CC1} se recomienda (de acuerdo con el datasheet) que sea de 47nF para compensar el error del amplificador de corriente de carga que contiene el chip internamente.

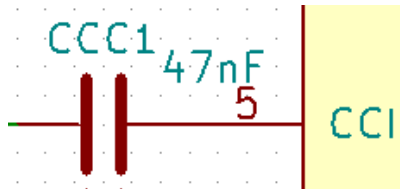


Ilustración 31: Pin 5 (CCI) del chip MAX1873SEEE

El condensador C_{CCS1} se recomienda en el datasheet que sea de 47nF para compensar el error del amplificador de corriente de entrada.

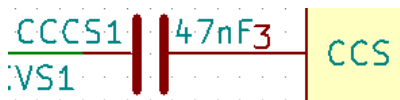


Ilustración 32: Pin 3 (CCS) del chip MAX1873SEEE

El condensador C_{CCVS1} , la resistencia R_{CCV1} y el condensador C_{CCVP1} son de 0,1 μ F, 10k Ω y 1nF respectivamente de acuerdo con las recomendaciones del datasheet.

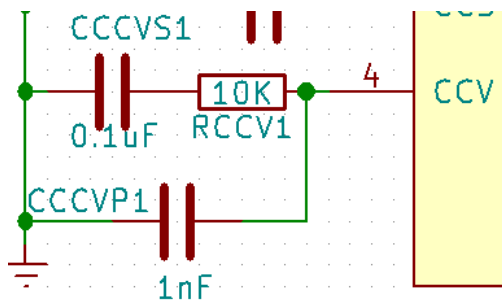


Ilustración 33: Pin 4 (CCV) del chip MAX1873SEEE

El condensador C_{VL1} se recomienda que sea 2,2 μ F entre VL y GND para asegurar estabilidad.

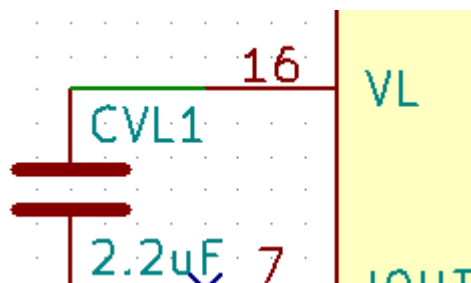


Ilustración 34: Pin 16 (VL) del chip MAX1873SEEE

El condensador C_{VH1} se recomienda que sea de $0,22\mu\text{F}$ entre VH y DCIN.

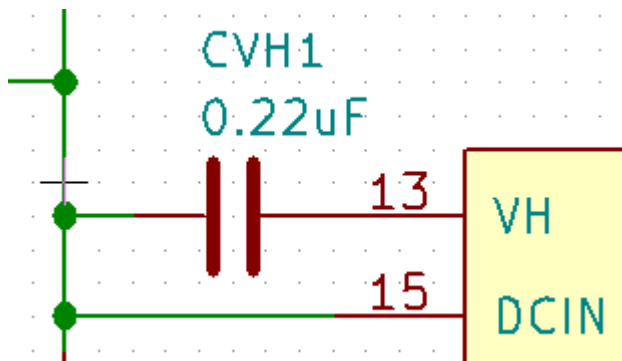


Ilustración 35: Pin 13 (VH) del chip MAX1873SEEE

El condensador C_{DCIN1} se recomienda que sea de $0,22\mu\text{F}$ entre DCIN y GND.

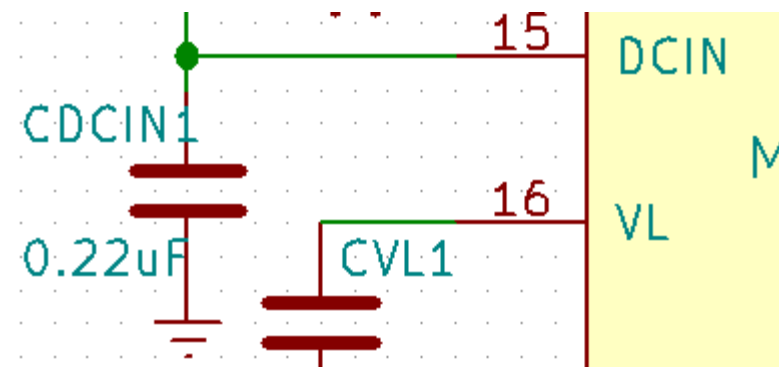


Ilustración 36: Pin 15 (DCIN) del chip MAX1873SEEE

El condensador C_{REF1} se recomienda que sea de $1\mu\text{F}$ para asegurar que la referencia interna de 4.2V sea estable.

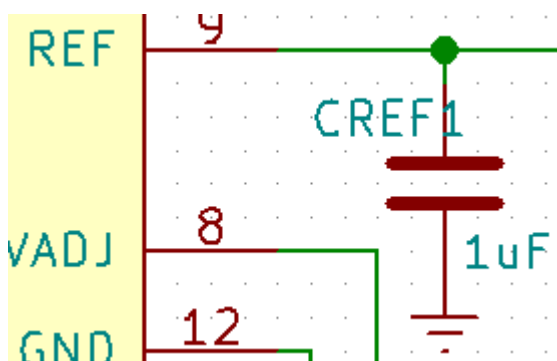


Ilustración 37: Pin 9 (REF) del chip MAX1873SEEE

El condensador C_{BATT1} se recomienda que sea de $47\mu\text{F}$ para la versión S del chip MAX1873.

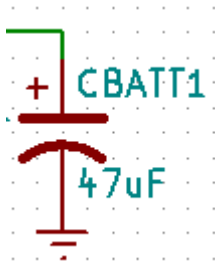


Ilustración 38: Condensador C_{BATT1}

Las resistencias R_5 y R_6 se recomienda que sean de $100\text{k}\Omega$ cada una para una tensión de $4,2\text{V}$ por celda de la batería.

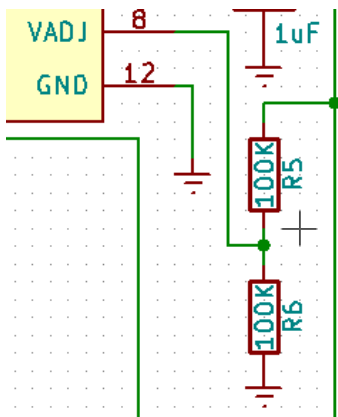


Ilustración 39: Divisor de tensión en el pin 8 (VADJ) del chip MAX1873SEEE

Las resistencias R_{CSS1} y R_{CSB} se calculan con las siguientes fórmulas para obtener una I_{CHG} y una I_{IN} de aproximadamente 3A

$$I_{IN} = \frac{0,1\text{V}}{R_{CSS}} \quad (\text{ecuación 14})$$

$$3\text{A} = \frac{0,1\text{V}}{R_{CSS}} \quad (\text{ecuación 15})$$

$$R_{CSS} = 0.033\Omega \quad (\text{ecuación 16})$$

$$I_{CHG} = \frac{0,2\text{V}}{R_{CSB}} \quad (\text{ecuación 17})$$

$$3\text{A} = \frac{0,2\text{V}}{R_{CSB}} \quad (\text{ecuación 18})$$

$$R_{CSB} = 0.068\Omega \quad (\text{ecuación 19})$$

3.1.2. LTC3621

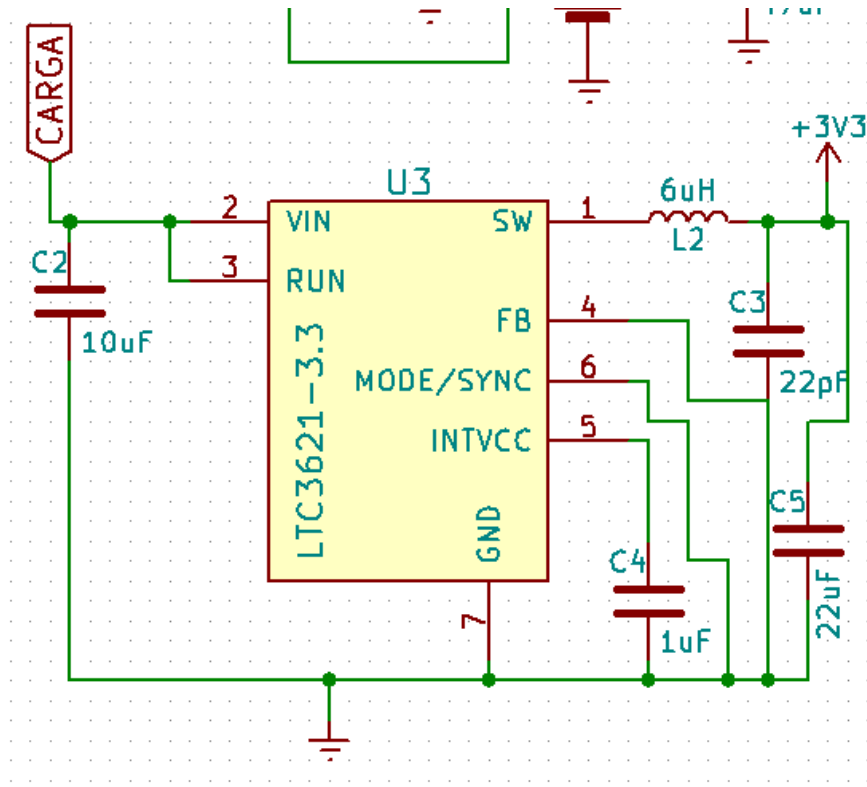


Ilustración 40: Chip LTC3621-3.3

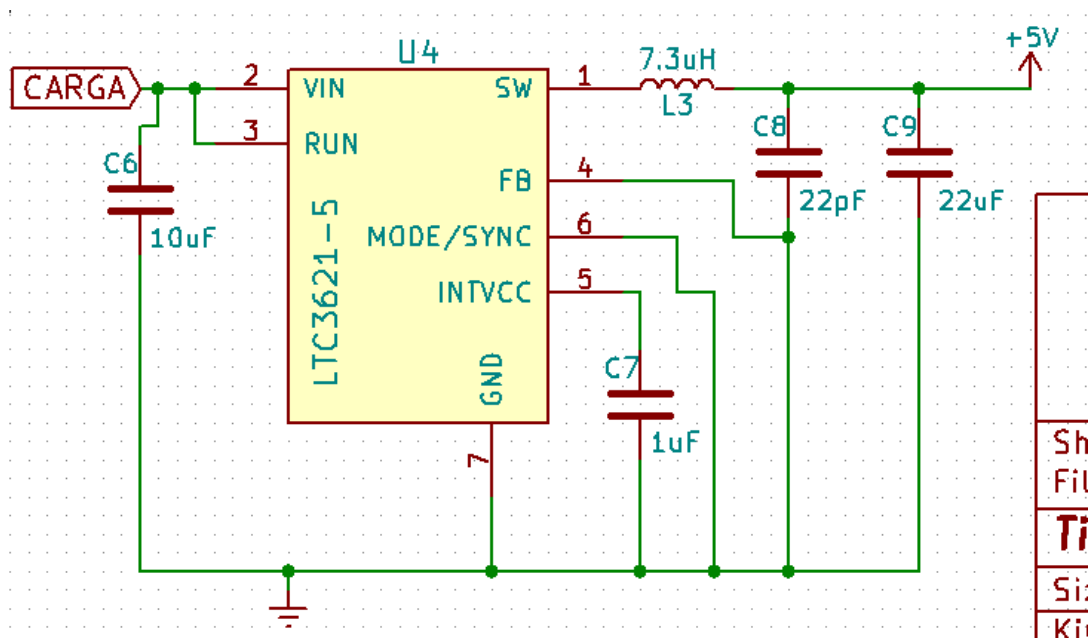


Ilustración 41: Chip LTC3621-5

Sh
Fi
Ti
Si
Ki

Para ambas versiones las formulas a aplicar son las mismas. Durante la resolución de los cálculos se pondrá entre paréntesis el valor que cambie entre la versión de 3,3V y la de 5V del componente. Para el diseño se ha tomado el criterio de tener un ΔI_L máximo de 0,4 y un V_{DROOP} máximo de 0,054V

Para el cálculo de la inductancia en la salida:

$$L = \frac{V_{OUT}}{f \cdot \Delta I_L} \left(1 - \frac{V_{OUT}}{V_{IN}}\right) \text{ (ecuación 20)}$$

$$L = \frac{3.3(5)}{1 \cdot 0.4} \left(1 - \frac{3.3(5)}{12V}\right) \text{ (ecuación 21)}$$

$$L = 6\mu H (7,3\mu H) \text{ (ecuación 22)}$$

Para los condensadores de salida del componente:

$$C_{OUT} = 3 \cdot \frac{\Delta I_{OUT}}{f \cdot V_{DROOP}} \text{ (ecuación 23)}$$

$$C_{OUT} = 3 \cdot \frac{0.4}{1 \cdot 0.054} \text{ (ecuación 24)}$$

$$C_{OUT} = 22\mu F \text{ (ecuación 25)}$$

El resto de componentes que afectan a estos 2 componentes tienen valores recomendados por el datasheet.

3.1.3. ESP32-WROOM

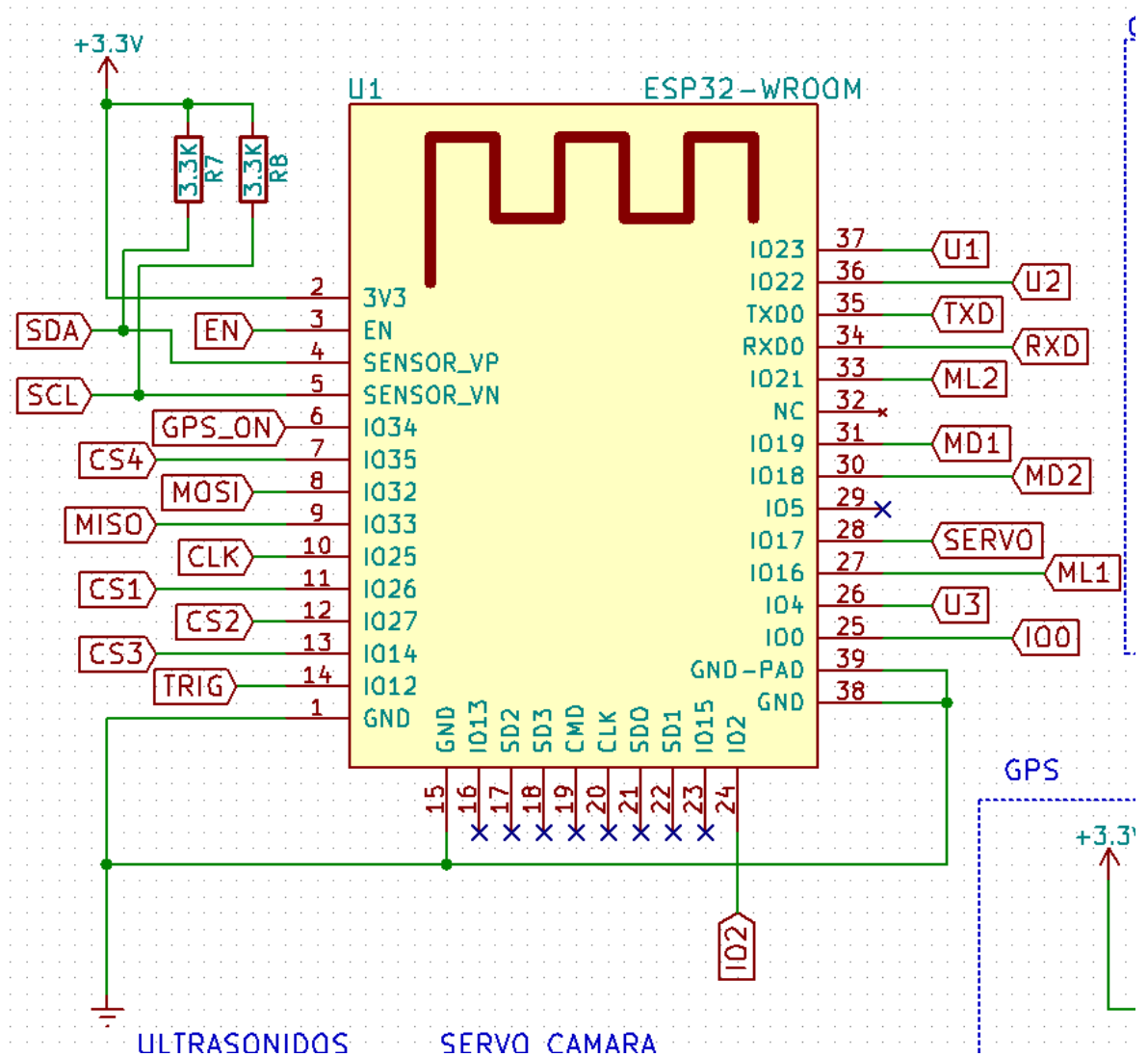


Ilustración 42: ESP32WROOM

En los pines 4 y 5 se colocan 2 resistencias de $3.3k\Omega$ conectadas a la fuente de 3,3V como protección.

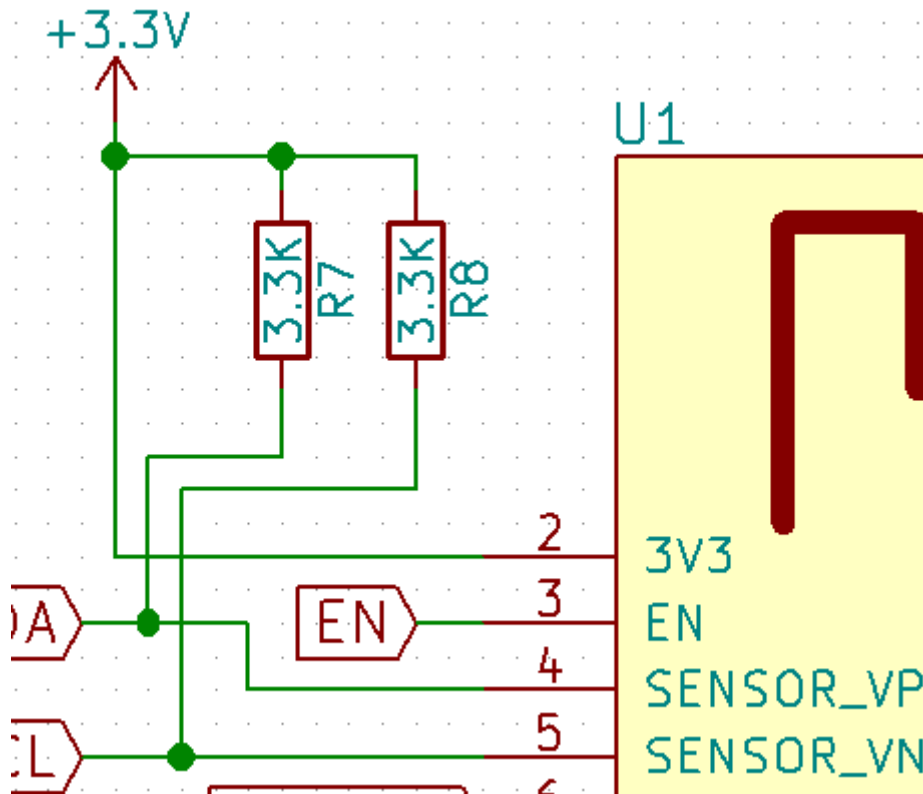


Ilustración 43: Resistencias de protección en los pines 4 y 5 del ESP32

Las resistencias conectadas en los pines 24 y 25 (IO2 e IO0 respectivamente) y la resistencia y condensador del pin 3 (EN) son los recomendados por el datasheet y son para configurar el funcionamiento del ESP32.

3.1.4. Cálculo de Capacidad de la Batería

Para el cálculo de la batería tomaremos en cuenta 2 Valores.

El pico máximo de intensidad en el caso más desfavorable que pueden pedir todos los componentes del sistema. Y el consumo medio del sistema.

Pico máximo de intensidad:

- ESP-WROOM-32: 600mA
- 3 Ultrasonidos: 15mA + 15mA + 15mA
- 2 LTC3621: 3.5 μ A + 3.5 μ A
- GPS: 42mA
- Servo: 730mA.
- Cámara: 390mA
- Giroscopio, Acelerómetro y Magnetómetro: 5mA
- 4 ESC+Motores: 12A + 12A + 12A + 12A

Esto nos da un pico máximo de intensidad de aproximadamente 50A

Consumo Medio durante una hora dependiendo de la actividad normal que debería tener:

Para realizar este cálculo antes deberemos calcular cuántos amperios consumen los motores para mantener en el aire el dron.

- ESP-WROOM-32: 80mA · 1h
- 3 Ultrasonidos: (15mA + 15mA + 15mA) · 1h
- 2 LTC3621: (3.5 μ A + 3.5 μ A) · 1h
- GPS: 22mA · 1h
- Servo: 270mA · 0.25h
- Cámara: 390mA · 1h
- Giroscopio, Acelerómetro y Magnetómetro: 5mA · 1h
- 4 ESC+Motores: (10.35A + 10.35A + 10.35A + 10.35A) · 1h

Esto nos da un consumo medio de intensidad de aproximadamente 42.5Ah.

Para no descargar en exceso la batería, el nivel de descarga debería ser del 80% para baterías de Litio. Habiendo establecido que queremos una autonomía de una media hora nos daría una capacidad de unos 26600 Ah

Así que la batería a montar tendrá que poder dar un pico de intensidad de 50A y tener una capacidad de 26600mAh.



Dado que una batería de esa capacidad sería excesivamente grande y pesada e imposibilitaría que el dron despegase se va a optar por reducir la autonomía de vuelo y hacer la batería extraíble de forma que se pueda tener varias baterías e ir intercambiándolas.

En cada momento en el dron irá montada una batería de LítioPolimero de 5200mAh. Que nos da una autonomía de vuelo de 6 minutos por batería.

4. BIBLIOGRAFÍA

Bouabdallah, S., Noth, A., & Siegwart, R. (2004). PID vs LQ control techniques applied to an indoor micro quadrotor. In *2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2004. (IROS 2004). Proceedings* (Vol. 3, pp. 2451–2456 vol.3). <http://doi.org/10.1109/IROS.2004.1389776>

Castillo, P., Lozano, R., & Dzul, A. (2005). Stabilization of a mini rotorcraft with four rotors. *IEEE Control Systems*, 25(6), 45–55. <http://doi.org/10.1109/MCS.2005.1550152>

Chirtel, E., Knoll, R., Le, C., Mason, B., Peck, N., Robarge, J., & Lewin, G. C. (2015). Designing a spatially aware, autonomous quadcopter using the android control sensor system. In *Systems and Information Engineering Design Symposium (SIEDS), 2015* (pp. 35–40). <http://doi.org/10.1109/SIEDS.2015.7117003>

Dikmen, I. C., Arisoy, A., & Temeltas, H. (2009). Attitude control of a quadrotor. In *4th International Conference on Recent Advances in Space Technologies, 2009. RAST '09* (pp. 722–727). <http://doi.org/10.1109/RAST.2009.5158286>

Escareno, J., Salazar-Cruz, S., & Lozano, R. (2006). Embedded control of a four-rotor UAV. In *American Control Conference, 2006* (p. 6 pp.–). <http://doi.org/10.1109/ACC.2006.1657333>

He, R., Prentice, S., & Roy, N. (2008). Planning in information space for a quadrotor helicopter in a GPS-denied environment. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2008. ICRA 2008* (pp. 1814–1820). <http://doi.org/10.1109/ROBOT.2008.4543471>

Hoffmann, G., Huang, H., Waslander, S., & Tomlin, C. (n.d.). Quadrotor Helicopter Flight Dynamics and Control: Theory and Experiment. In *AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit*. American Institute of Aeronautics and Astronautics. Retrieved from <http://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/6.2007-6461>

Huang, H., Hoffmann, G. M., Waslander, S. L., & Tomlin, C. J. (2009). Aerodynamics and control of autonomous quadrotor helicopters in aggressive maneuvering. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2009. ICRA '09* (pp. 3277–3282). <http://doi.org/10.1109/ROBOT.2009.5152561>

Kendall, A. G., Salvapantula, N. N., & Stol, K. A. (2014). On-board object tracking control of a quadcopter with monocular vision. In *2014 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)* (pp. 404–411). <http://doi.org/10.1109/ICUAS.2014.6842280>

Lily. (n.d.). Retrieved February 15, 2016, from <https://lilycamera.tilt.com/lily--2>

Madani, T., & Benallegue, A. (2006). Backstepping Control for a Quadrotor Helicopter. In *2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* (pp. 3255–3260). <http://doi.org/10.1109/IROS.2006.282433>



Martin, P., & Salaun, E. (2010). The true role of accelerometer feedback in quadrotor control. In *2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* (pp. 1623–1629). <http://doi.org/10.1109/ROBOT.2010.5509980>

Raffo, G. V., Ortega, M. G., & Rubio, F. R. (2010). An integral predictive/non-linear control structure for a quadrotor helicopter. *Automatica*, *46*(1), 29–39. <http://doi.org/10.1016/j.automatica.2009.10.018>

Tayebi, A., & McGilvray, S. (2004). Attitude stabilization of a four-rotor aerial robot. In *43rd IEEE Conference on Decision and Control, 2004. CDC* (Vol. 2, pp. 1216–1221 Vol.2). <http://doi.org/10.1109/CDC.2004.1430207>

Zemalache, K. M., Beji, L., & Marref, H. (2005). Control of an under-actuated system: application a four rotors rotorcraft. In *2005 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)* (pp. 404–409). <http://doi.org/10.1109/ROBIO.2005.246301>

Zuo, Z. (2010). Trajectory tracking control design with command-filtered compensation for a quadrotor. *IET Control Theory Applications*, *4*(11), 2343–2355. <http://doi.org/10.1049/iet-cta.2009.0336>

<https://vueloartificial.com/introduccion/toma-de-contacto/principios-basicos-de-vuelo/>

<https://cursopilotodedrones.net/leccion/4-4-fuerzas-que-afectan-en-el-vuelo/>

<https://dronsri.blogspot.com.es/2016/01/primeras-ideas-claras.html>

Relación de documentos

<input checked="" type="checkbox"/> Memoria	62	páginas
<input type="checkbox"/> Anexos	288	páginas

La Almunia, a 08 de 11 de 2017

Firmado: Daniel Fandos Duce